



**You have downloaded a document from
RE-BUS
repository of the University of Silesia in Katowice**

Title: Wyznaczanie przestrzennego rozkładu dawki w terapii protonowej oka z wykorzystaniem pakietu GEANT4

Author: Małgorzata Grządziel

Citation style: Grządziel Małgorzata. (2015). Wyznaczanie przestrzennego rozkładu dawki w terapii protonowej oka z wykorzystaniem pakietu GEANT4. Praca doktorska. Katowice : Uniwersytet Śląski

© Korzystanie z tego materiału jest możliwe zgodnie z właściwymi przepisami o dozwolonym użytku lub o innych wyjątkach przewidzianych w przepisach prawa, a korzystanie w szerszym zakresie wymaga uzyskania zgody uprawnionego.



UNIwersytet ŚLĄSKI
W KATOWICACH



Biblioteka
Uniwersytetu Śląskiego



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego

UNIwersytet Śląski
Wydział Matematyki, Fizyki i Chemii
Instytut Fizyki im. Augusta Chełkowskiego
Zakład Fizyki Jądrowej i Jej Zastosowań

Małgorzata Grządziel

Rozprawa doktorska

**Wyznaczanie przestrzennego rozkładu dawki w
terapii protonowej oka z wykorzystaniem pakietu
GEANT4.**

Promotor: prof. dr hab. Wiktor Zipper

Katowice 2015

Światłem ciała jest oko. Jeśli więc twoje oko jest zdrowe, całe twoje ciało będzie w świetle. Lecz jeśli twoje oko jest chore, całe ciało twoje będzie w ciemności.

Mt 6, 22-23

Pracę tę dedykuję Pawłowi i Asi.

Dziękuję mojemu promotorowi, prof. zw. dr hab. Wiktorowi Zipperowi, za życzliwość, wsparcie oraz wiele cennych uwag i rad.

Dziękuję pani dr Teresie Cywickiej-Jakiel oraz innym pracownikom Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie, za umożliwienie zebrania szczegółowych informacji na temat stanowiska terapii protonowej oka oraz za udostępnienie danych pomiarowych.

Dziękuję także dr Kindze Polaczek-Grelik, dr Adamowi Konefałowi, dr Piotrowi Szaflikowi, mgr Marcinowi Łaciakowi oraz dr Jerzemu Kuczyńskiemu, za pomoc i cenne wskazówki.

Dziękuję rodzicom za umożliwienie pogodzenia macierzyństwa z pracą naukową.

Spis treści

Spis treści	3
1 Cel pracy	6
2 Oddziaływanie protonów z materią.	7
2.1 Jonizacja	7
2.2 Rozpraszanie	10
2.3 Reakcje jądrowe	12
3 Terapia protonowa	14
4 Stanowisko terapii protonowej w IFJ PAN w Krakowie	23
4.1 Cyklotron AIC-144	23
4.2 System transportu wiązki	24
4.3 Stanowisko terapeutyczne	26
4.3.1 Dyskryminator zasięgu	26
4.3.2 Modulator zasięgu	27
4.3.3 Komory jonizacyjne	27
4.3.4 Kolimator	28
4.4 Cyklotron Proteus C-235	31
5 GEANT4	34
5.1 Symulacje komputerowe	34
5.2 Metoda Monte Carlo	34
5.3 GEANT4	35

6	Przykłady zastosowania GEANT4 do obliczania rozkładu dawki w różnych ośrodkach terapii protonowej	38
6.1	Stanowisko CATANA we Włoszech	38
6.2	Symulacje dla ośrodków terapii protonowej w Japonii	41
6.3	Optymalizacja parametrów symulacji dla terapii protonowej	43
7	Porównianie symulacji z danymi pomiarowymi	47
8	Geometria i materiały programu symulacyjnego	50
8.1	Definicje materiałów	50
8.2	Elementy stanowiska terapii protonowej w symulowanym programie .	51
9	Wpływ elementów geometrycznych programu na rozkład dawki na głębokości	54
10	Symulacje różnych rozkładów energetycznych wiązki protonowej	58
10.1	Wiązka monoenergetyczna	58
10.2	Wiązka z energetycznym rozkładem normalnym	60
10.3	Zmodyfikowany rozkład Gaussa	62
10.4	Rozkład energetyczny opisany histogramem	64
10.5	Rozkłady energetyczne dla różnych głębokości w fantomie wodnym .	67
11	Porównanie wiązki równoległej i wiązki rozbieżnej.	69
12	Przejście wiązki protonów przez warstwę absorbenta	71
13	Symulacje komory Markus	75
14	Symulacje profilu wiązki	81
14.1	Geometria programu	81
14.2	Wpływ elementów geometrycznych na profil poprzeczny wiązki	82
14.3	Porównanie z danymi pomiarowymi	83
15	Uprozczone symulacje modulatora zasięgu	85
15.1	Założenia	85
15.2	Geometria programu	86
15.3	Obliczanie geometrii modulatora.	87

16 Symulacje rzeczywistego modulatora zasięgu	94
17 Wykorzystanie bibliotek GEANT4 w projektowaniu modulatorów energii	99
18 Wnioski	102
Spis rysunków	106
Spis tabel	112
Bibliografia	114

Rozdział 1

Cel pracy

Celem pracy było opracowanie algorytmu i przeprowadzenie symulacji głębokościowego rozkładu dawki oraz profilu poprzecznego terapeutycznej wiązki protonów, stosowanej w leczeniu nowotworów oka.

Przestrzenny rozkład dawki jest bardzo istotnym parametrem w terapii protonowej nowotworów. Symulacje komputerowe, bazujące na metodzie Monte Carlo, wykorzystujące pakiet GEANT4, są użytecznym narzędziem w badaniu wpływu różnych parametrów na rozkład dawki zdeponowanej przez promieniowanie jonizujące. W wielu ośrodkach na świecie, gdzie wykorzystywana jest terapia hadronowa (np. we Włoszech, w Japonii, w Niemczech) przeprowadzane są symulacje komputerowe rozkładu dawki zdeponowanej w trakcie terapii w ciele pacjenta. Program symulacyjny, będący efektem tej pracy, jest pierwszym programem wykorzystującym pakiet GEANT4, którego geometria wzorowana jest na stanowisku terapii protonowej oka w Instytucie Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk im. H. Niewodniczańskiego w Krakowie. Wyniki otrzymane za pomocą programu symulacyjnego zostały porównane z danymi pomiarowymi uzyskanymi za pomocą komory jonizacyjnej typu Markus w IFJ PAN w Krakowie. Dobra zgodność symulacji z pomiarem świadczy o prawidłowym działaniu programu. Pisząc program symulacyjny dokonujemy niezbędnych uproszczeń, jednak nie można pominąć zbyt wielu czynników, aby nie dopuścić do sytuacji, że symulacja daje inny wynik niż pomiar.

Praca została wykonana z wykorzystaniem Infrastruktury PL-Grid, która umożliwiła wykonanie programów, wymagających dużej liczby symulowanych cząstek.

Rozdział 2

Oddziaływanie protonów z materią.

Protony, podobnie jak inne ciężkie cząstki naładowane, podczas przechodzenia przez materię ulegają licznym interakcjom z atomami absorbenta. Trzy najważniejsze skutki oddziaływania to wybite elektronów z powłok, rozproszenie wiązki oraz reakcje jądrowe.

2.1 Jonizacja

Jonizacja atomów ośrodka, do którego wpada wiązka protonów, ma bardzo duże znaczenie jeśli chodzi o wyjaśnienie kształtu rozkładu dawki na głębokości. Dodatkowo naładowany jon przyciąga do siebie elektrony, znajdujące się w absorbencie i przekazuje im energię. Dzięki temu elektrony mogą przenieść się na wyższe poziomy energetyczne lub zostać usunięte z atomu.

Straty energii na jonizację opisuje wzór Bethego-Blocha:

$$\frac{-dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 \right), \quad (2.1)$$

gdzie:

$-dE/dx$ - straty energii cząstki na jednostkę długości drogi w materiale absorbenta,

z - liczba atomowa padającej cząstki,

Z - liczba atomowa ośrodka,

A - liczba masowa ośrodka,
 c - prędkość światła w próżni,
 m_e - masa elektronu,
 K - stała, $K = 307 \text{ keV cm}^2/g$,
 β - stosunek prędkości cząstki do prędkości światła,
 I - średni potencjał jonizacji, wyrażany wzorem:

$$I = 9,1 \cdot Z \left(1 + \frac{1,9}{Z^{2/3}} \right) \text{ eV}, \quad (2.2)$$

γ - czynnik relatywistyczny:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (2.3)$$

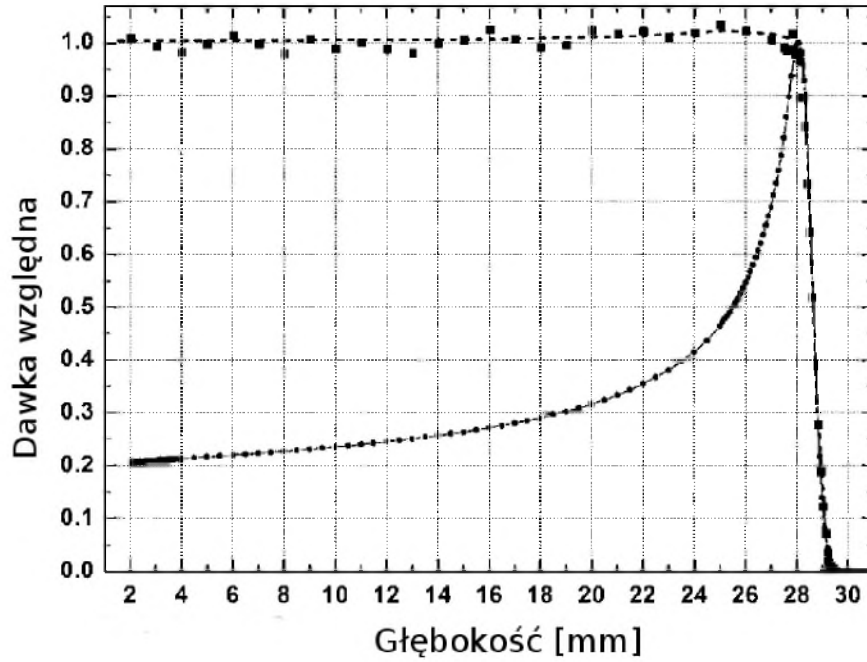
v - prędkość cząstki,
 T_{max} - maksymalna energia kinetyczna, jaka może być przekazana elektronowi w pojedynczym zderzeniu,

$$T_{max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + 2\gamma m_e/M + (m_e/M)^2}, \quad (2.4)$$

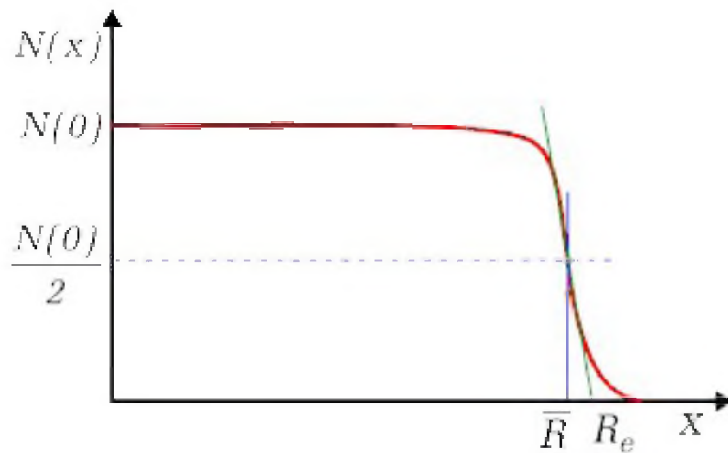
M - masa cząstki.

Wykres, który opisuje zależność gęstości jonizacji od głębokości nazywany jest krzywą Bragga. Dla mniejszych głębokości energia zdeponowana przez protony jest stała (obszar plateau), a dla większych głębokości występuje wyraźne maksimum-pik Bragga. Na głębokościach większych, niż głębokość piku dochodzi do gwałtownego spadku zdeponowanej energii do zera. Największe straty energii mają miejsce pod koniec drogi cząstki naładowanej. Z terapeutycznego punktu widzenia istotną wielkością jest dawka, zdeponowana w tkankach podczas napromieniania. Jest ona stosunkiem energii zdeponowanej w danym materiale przez promieniowanie do masy. Dawka jest zatem proporcjonalna do strat energii na głębokości i jej rozkład głębokościowy ma taki sam przebieg, jak krzywa Bragga. Na rysunku 2.1 znajduje się pik Bragga oraz poszerzony pik Bragga (SOBP) [3, 4].

Podczas przejścia wiązki protonowej przez warstwę absorbenta ilość cząstek w wiązce początkowo pozostaje stała, natomiast na pewnej głębokości obserwuje się gwałtowny spadek liczby rejestrowanych protonów (Rys. 2.2).

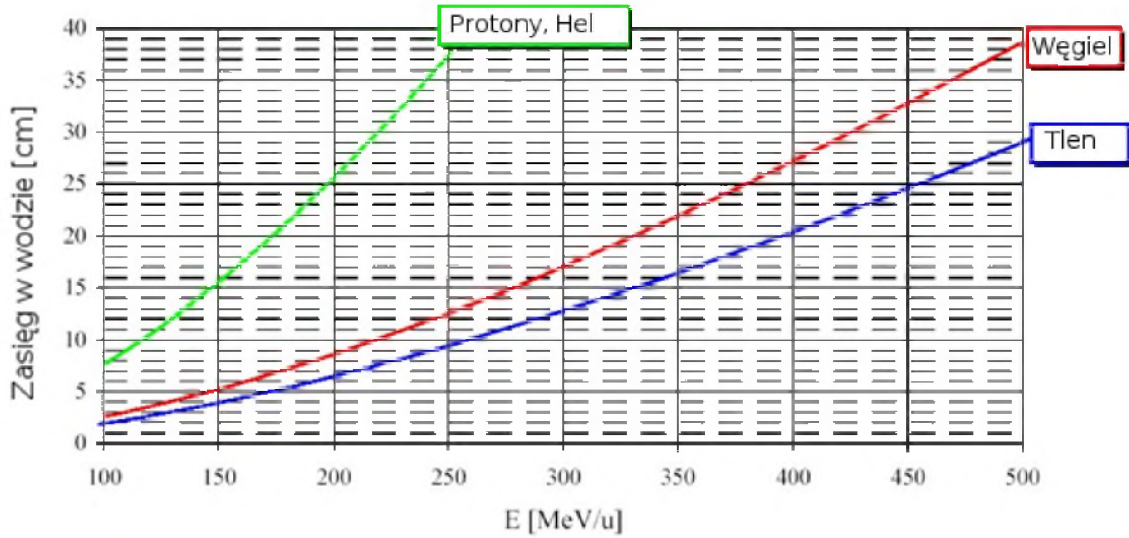


Rys. 2.1: Rozkład dawki na głębokości dla wiązki protonów o energii 60 MeV zmierzony w wodzie. Pojedynczy pik Bragga oznaczono kołami, a poszerzony pik Bragga- kwadratami. Pomiar wykonany był w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie [2].



Rys. 2.2: Zasięgowy charakter absorpcji ciężkich cząstek naładowanych. Średni zasięg \bar{R} oznacza głębokość, dla której liczba cząstek spada o połowę, a R_e - zasięg ekstrapolowany, stanowiący odległość odpowiadającą przecięciu z osią X stycznej do krzywej $N(x)$ w punkcie odpowiadającym połowie wysokości tej krzywej [7].

Im większa jest energia ciężkiej cząstki naładowanej, tym większy jest jej zasięg w wodzie. Zależność ta zilustrowana jest na wykresie 2.3.



Rys. 2.3: Zasięg ciężkich cząstek naładowanych w wodzie w funkcji energii początkowej wiązki [6].

2.2 Rozpraszanie

Gdy ciężka cząstka naładowana, na przykład proton, zbliży się do jądra atomowego ośrodka, możliwa jest zmiana kierunku jego ruchu (Rys. 2.5). Kąt rozpraszania jest zazwyczaj mały i z dobrym przybliżeniem może być opisany rozkładem Gaussa [10]. Kąt ten zależy od grubości warstwy absorbenta, przez który przeszły ciężkie cząstki naładowane zgodnie ze wzorem:

$$\sqrt{\langle \Theta^2 \rangle} = \frac{Z}{Pc\beta} (20 \text{ MeV}) \sqrt{\frac{L}{X_0}}, \quad (2.5)$$

gdzie:

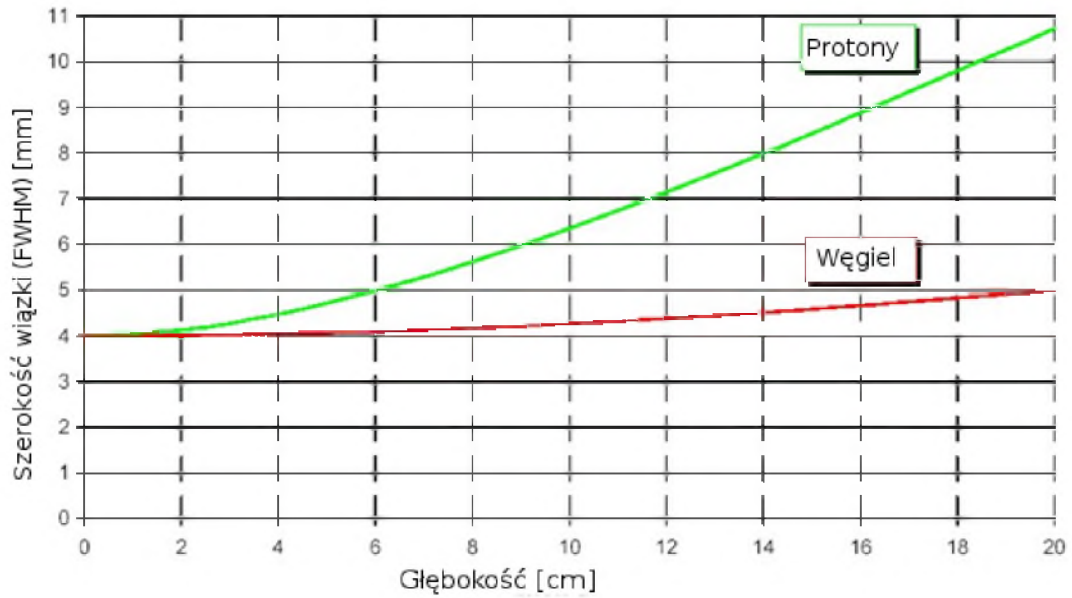
- Θ - kąt rozproszenia,
- Z - liczba atomowa cząstki,
- P - moment pędu cząstki,

L - grubość warstwy, przez którą przeszła ciężka cząstka naładowana,
 X_0 - długość radiacyjna, charakteryzująca materiał o określonej liczbie atomowej oraz cząstkę naładowaną. Przykładowo dla powietrza wynosi ona 304 m, dla wody 34 cm, a dla aluminium 9,8 cm. W przybliżeniu może być ona obliczona ze wzoru:

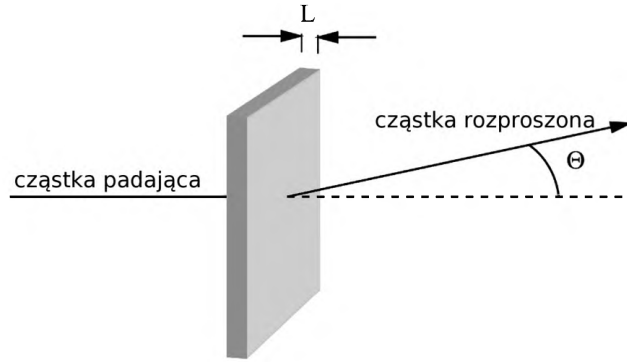
$$\frac{1}{X_0} \approx 4\alpha r_0^2 \frac{\rho N_A}{A_r} Z_{nuc} (1 + Z_{nuc}) \ln \left(\frac{183}{\sqrt[3]{Z_{nuc}}} \right). \quad (2.6)$$

W równaniu 2.6, Z_{nuc} oznacza liczbę atomową ośrodka, α - stałą struktury subtelnej (1/137), r_0 - klasyczny promień elektronu ($2,82 \cdot 10^{-15}$ m), a N_A - liczbę Avogadro.

Na wykresie 2.4 widać, że dla większych głębokości pomiaru wiązka protonów ma większą szerokość. Wiązka jonów węgla poszerza się w znacznie mniejszym stopniu.



Rys. 2.4: Szerokość wiązki ciężkich cząstek naładowanych (FWHM), w funkcji głębokości w fantomie wodnym [6].



Rys. 2.5: Rozpraszanie cząstek naładowanych w materiale o grubości L [10].

2.3 Reakcje jądrowe

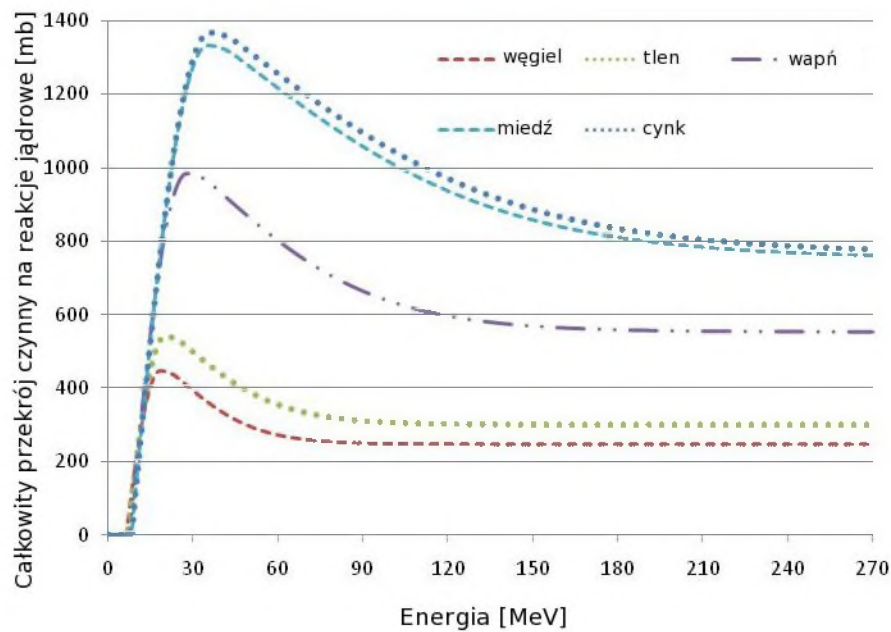
W radioterapii protonowej nowotworów oka stosowane są protony o energii do około 60 MeV, które oddziałują także z jądrami atomowymi ośrodka. Reakcje jądrowe mają mniejsze znaczenie, niż oddziaływania z elektronami powłok atomowych, ponieważ prawdopodobieństwo ich zajścia jest mniejsze, niż prawdopodobieństwo jonizacji. Oddziaływania jądrowe powodują jednak powstawanie cząstek wtórnych, najczęściej neutronów. Neutrony o niskich energiach ulegają zderzeniom elastycznym z jądrami wodoru w penetrowanym ośrodku, nadając im energię kinetyczną. Protony te mogą poruszać się w innym kierunku, niż protony z pierwotnej wiązki. W obszarze spadku dawki za pikiem Bragga dawka pochodząca od protonów wtórnych może stanowić 5-20% zaabsorbowanej dawki [9]. Dawka zdeponowana przez inne powstające cząstki, takie jak deuterony, tryt, ${}^3_2\text{He}$ i cząstki alfa nie przekracza 0,1% całkowitej dawki [13].

Dla protonów stosowanych w terapii nowotworów oka (energie około 60 MeV i mniejsze) mogą zajść następujące reakcje [[40]]:

- z jądrami wodoru: (p, np) , (p, γ) ;
- z jądrami węgla: (p, np) , $(p, np\alpha)$, (p, γ) , (p, α) ;
- z jądrami azotu: (p, n) , (p, np) , (p, d) , (p, α) , $(p, 2\alpha)$, $(p, 2n2p)$, $(p, n\alpha)$, (p, γ) ;
- z jądrami tlenu: (p, np) , $(p, 2np)$, $(p, np\alpha)$, (p, γ) , (p, p) , (p, α) , $(p, p\alpha)$, $(p, d2\alpha)$, $(p, 2n2p)$, $(p, {}^3\text{He}\alpha)$;

- z jądrami aluminium: (p, n) , (p, np) , $(p, np\alpha)$, (p, p) , $(p, n3p)$;
- z jądrami argonu: (p, n) ;
- z jądrami miedzi: (p, n) , $(p, 2n)$, $(p, 3n)$, $(p, 2np)$, $(p, np\alpha)$, (p, γ) , (p, α) , (p, np) , $(p, 4n)$, $(p, n\alpha)$;
- z jądrami cynku: (p, n) , $(p, n\alpha)$, (p, np) , $(p, 2np)$, $(p, n2p)$, (p, γ) , (p, α) , $(p, 3n2p)$, $(p, 2n2p)$, $(p, 2n)$, $(p, 3n)$;
- z jądrami cyny: (p, γ) , $(p, 2p)$, (p, n) , $(p, 2n)$, $(p, 3n)$, $(p, 4n)$, (p, α) , $(p, 7n)$;
- z jądrami tantalu: (p, n) , $(p, 2n)$, $(p, 3n)$, (p, np) , $(p, 4n)$, $(p, 5n)$.

Przekrój czynny na reakcje jądrowe zależy od energii protonów. Wykresy zależności całkowitego przekroju czynnego od energii dla kilku wybranych pierwiastków znajdują się na rysunku 2.6.



Rys. 2.6: Całkowite przekroje czynne dla reakcji protonów z wybranymi pierwiastkami [11].

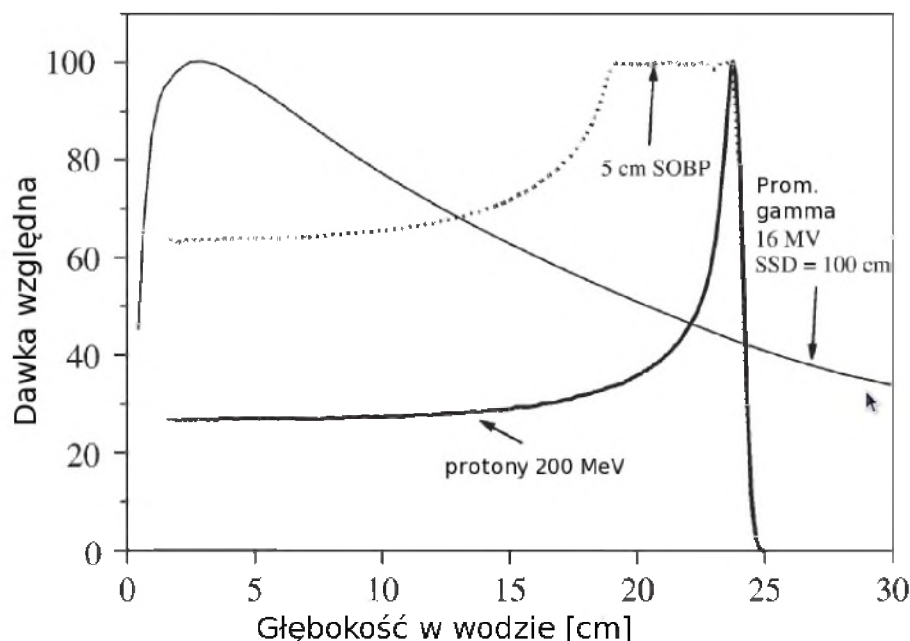
Rozdział 3

Terapia protonowa

Celem radioterapii jest zdeponowanie określonej przez lekarza dawki w obszarze guza nowotworowego, przy jednoczesnej ochronie przed zniszczeniem narządów krytycznych, istotnych dla funkcjonowania człowieka. Dawka, jaką otrzymuje tkanka zdrowa, powinna być w miarę możliwości jak najmniejsza. Już w 1946 roku Robert Wilson zaproponował, że zastosowanie protonów do leczenia nowotworów pomoże osiągnąć ten cel [1]. Korzystny rozkład dawki na głębokości pozwala na stworzenie takiego planu leczenia, w którym położenie komórek nowotworowych pokrywałoby się z pikiem Bragga, a tkanka zdrowa, znajdująca się przed pikiem, otrzymałaby dawkę znacznie mniejszą niż obszar zaplanowany do napromieniania. Komórki, które znajdują się za guzem, nie byłyby wcale napromieniane, dzięki całkowitemu spadkowi dawki za pikiem Bragga (Rys. 3.1) [17].

Obecnie stanowiska terapii protonowej oka funkcjonują w wielu krajach, np w Japonii, USA, Niemczech, Wielkiej Brytanii, Szwajcarii, Francji i Włoszech. Całkowite zniszczenie komórek nowotworowych w wyniku terapii protonowej zaobserwowano u ponad 90% pacjentów. Zaletą terapii protonowej oka jest duże prawdopodobieństwo zachowania funkcji wzroku [25].

W większości przypadków radioterapii nowotworów złośliwych, terapia fotonowa wraz z jej nowoczesnymi sposobami napromieniania (IMRT, RapidArc, CyberKnife) umożliwia stworzenie wystarczająco dobrego planu leczenia, jednak dla nowotworów zlokalizowanych blisko narządów krytycznych, korzystniejsze jest zastosowanie terapii protonowej. Takim przykładem są nowotwory oka, zlokalizowane w niewielkiej odległości od nerwu wzrokowego lub soczewki. Inne lokalizacje nowotworów to: głowa, szyja, okolice kręgosłupa lub prostata. Bardzo duża precyzja napromieniania,

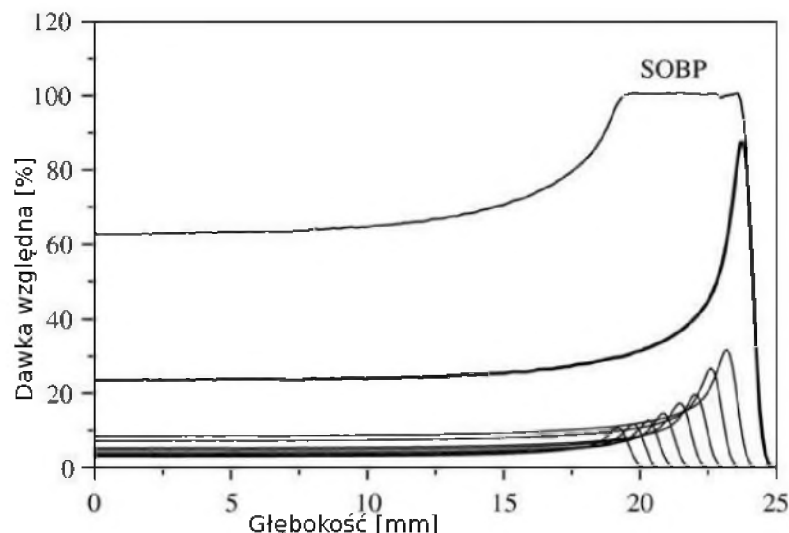


Rys. 3.1: Rozkłady dawki na głębokości dla wiązki fotonów (16 MV, pole 10cm x 10 cm), protonów o energii 200 MeV oraz wiązki protonów modulowanej w celu uzyskania poszerzonego pików Bragga o szerokości 5 cm [23].

charakterystyczna dla terapii protonowej, jest wadą w przypadku lokalizacji w obrębie jamy brzusznej i klatki piersiowej, gdzie występują naturalne ruchy, takie jak bicie serca, oddychanie czy perystaltyka jelit. Nawet niewielkie przesunięcie się nowotworu znacznie obniża skuteczność leczenia. W wielu przypadkach pacjent może odnieść nie mniejszy pożytek z leczenia konwencjonalnego niż z terapii protonami.

Zazwyczaj rozmiary nowotworu są większe, niż wymiary przestrzenne pików Bragga, dlatego rozwinięto różne systemy kształtowania wiązki, pozwalające na uzyskanie jednorodnego rozkładu dawki w całym obszarze napromienianym. Istnieją dwa rodzaje takich systemów: pasywne i aktywne.

W *pasywnym systemie kształtowania* wiązka poszerzana jest poprzez przejście przez folię rozpraszającą. Aby rozkład dawki w obszarze guza był jednorodny, składanych jest wiele pików Bragga, pochodzących od wiązek o różnych energiach. W ten sposób uzyskiwany jest poszerzony pik Bragga, oznaczany skrótem SOBP (Spread Out Bragg Peak) (Rys. 3.2). Uzyskuje się go, przepuszczając pierwotną wiązkę przez warstwy absorbenta o różnych grubościach, co powoduje zmniejszenie energii

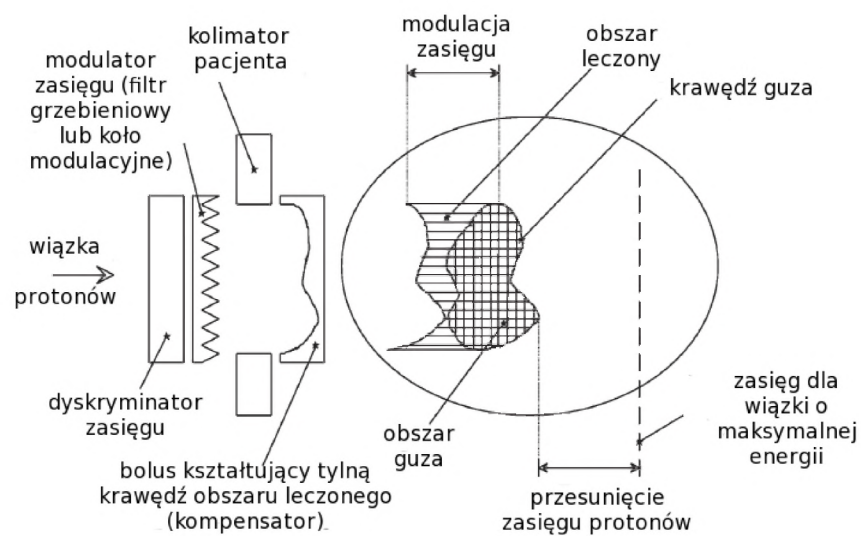


Rys. 3.2: Poszerzony pik Bragga (SOBP powstaje poprzez sumowanie rozkładów dawki pochodzących od wiązek o malejących energiach i malejącym natężeniu [23].

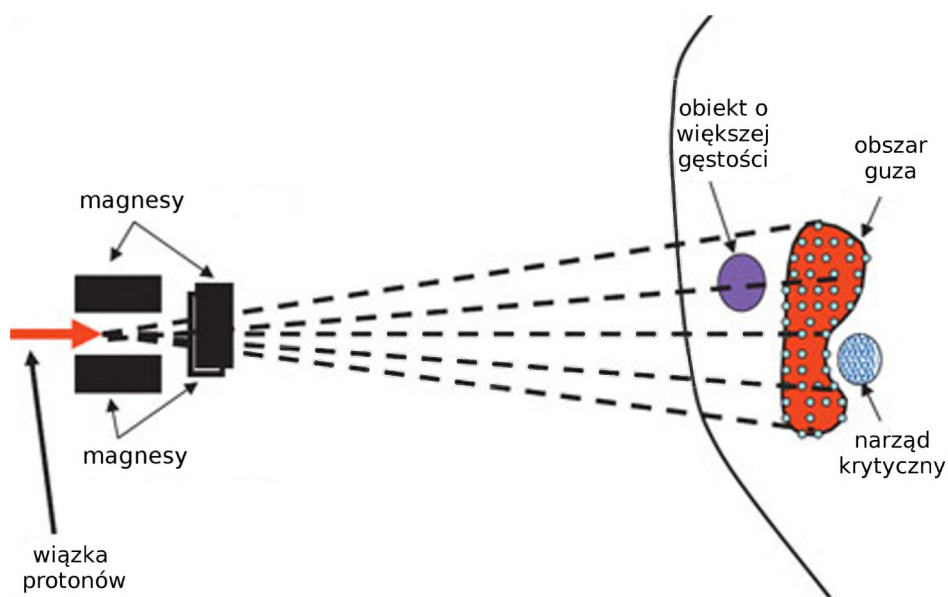
protonów wiązki. Urządzenia, wykorzystywane do wytworzenia SOBP to tzw. filtr grzebieniowy lub koło modulacyjne. Następnie protony przechodzą przez kolimator, który zatrzymuje cząstki nie podążające w kierunku guza (Rys. 3.3). Kolejnym elementem jest odpowiednio uformowany przestrzenny absorbent, tzn. bolus, który jeszcze dokładniej pozwala dopasować obszar napromieniony do kształtu nowotworu, dzięki czemu chronione są komórki położone za nowotworem. Elementy, takie jak koło modulacyjne, kolimator końcowy czy bolus tworzone są indywidualnie dla konkretnego pacjenta. Wadą systemu biernego jest to, że w niektórych przypadkach pojawia się zbyt wysoka dawka przed guzem, czego nie da się uniknąć.

W *aktywnym systemie kształtowania* wiązka protonów nie jest poszerzana. Pole magnetyczne powoduje, że protony są odchylane od pierwotnego kierunku i za każdym razem trafiają w inny fragment nowotworu. Obszar napromieniany podzielony jest na warstwy, a każda z nich na elementy objętości (woksele). Wiązka skanuje obszar nowotworu napromieniając każdy z wokseli po kolei, zaczynając od najgłębiej położonej warstwy, a kończąc na najpłytszej. Metoda ta, bardziej zaawansowana technologicznie niż metoda pasywna, umożliwia bardzo precyzyjne napromienianie, bez niepotrzebnego i szkodliwego napromieniania fragmentów zdrowej tkanki.

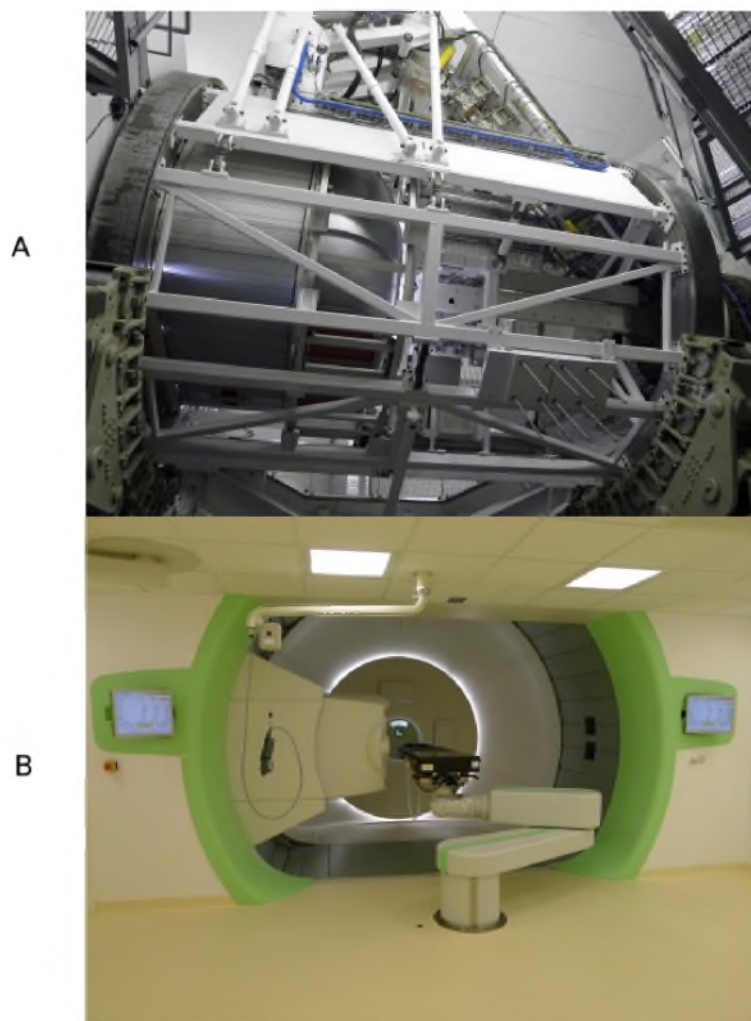
Współcześnie buduje się stanowiska terapii protonowej, wyposażone w ruchomą



Rys. 3.3: Pasywny system kształtowania wiązki [23].



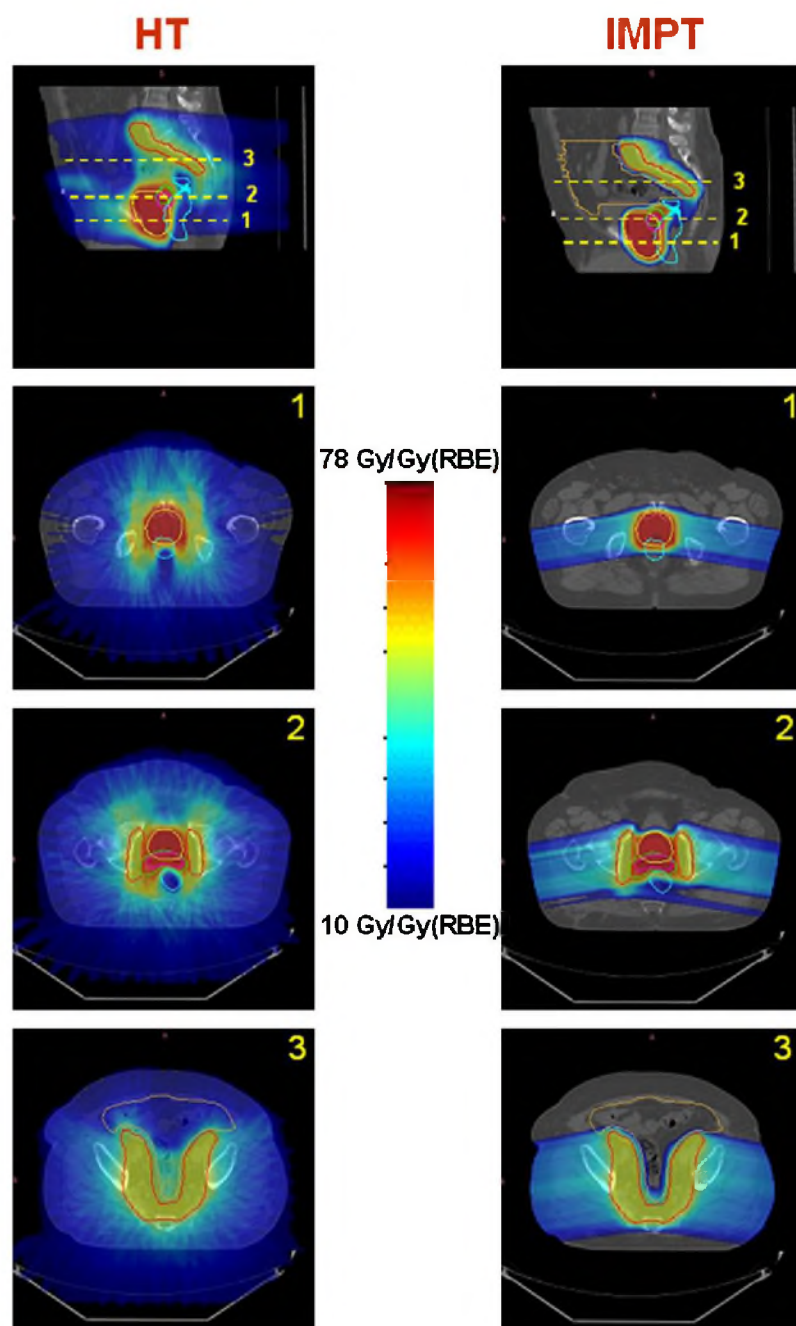
Rys. 3.4: Aktywny system kształtowania wiązki. Wiązka protonów przesuwana jest dzięki odpowiednio dobranym parametrom prostopadłych pól magnetycznych i napromienia poszczególne woksele po kolei [21].



Rys. 3.5: Gantry w Centrum Cyklotronowym Bronowice. Strona widoczna dla serwisu (A) i dla pacjenta (B) [15].

głowicę (gantry), dzięki której można napromieniać pacjenta z różnych kierunków, tak jak to od lat stosuje się w terapii wysokoenergetycznymi fotonami (Rys. 3.5). Metoda, w której wykorzystywane jest gantry, nazywa się IMPT (Intensity Modulated Proton Therapy). Pozwala ona na jeszcze doskonalsze zminimalizowanie dawki otrzymanej przez komórki zdrowe. Przykładowe zestawienie rozkładów dawek w ciele pacjenta dla nowoczesnej terapii wykorzystującej fotony- tomoterapii i dla IMPT znajduje się na rysunku 3.6.

Terapia protonowa znajduje się w fazie intensywnego rozwoju. W wielu miejscach na świecie buduje się nowe stanowiska. Tabela 3.1 zawiera zestawienie istnie-



Rys. 3.6: Porównanie rozkładu dawki dla terapii protonowej (IMPT-Intensity Modulated Proton Therapy) oraz tomoterapii z wykorzystaniem wiązki fotonów (HT-helical tomotherapy)[20].

jących i planowanych stanowisk terapii protonowej. Rok, podany w tabeli to data napromieniania pierwszego pacjenta.

Tabela 3.1: Ośrodki terapii protonowej na świecie [14].

Kraj	Miasto	Nazwa ośrodka	Rok
Chiny	Zibo	Wanjie Proton Therapy Center	2004
Czechy	Praga	Proton Therapy Center Czech	2012
Francja	Nicea	Centre Laccassagne	1991
France	Orsay	Centre de Protonthérapie de l'Institut Curie	1990
Niemcy	Berlin	HMI	1998
Niemcy	Heidelberg	Heidelberg Ion Therapy Center	2009
Niemcy	Monachium	Rinecker	2009
Niemcy	Drezno	Universitätsklinikum Carl Gustav Carus	2014
Niemcy	Essen	Westdeutsches Protonentherapiezentrum Essen	2013
Niemcy	Kilonia	University Schleswig-Holstein (UC S-H)	
Niemcy	Marburg	Rhön-Klinikum	
Włochy	Pavia	CNAO Pavia	2009
Włochy	Trento	Agenzia Provinciale Per la Protonterapia (ATreP)	2012
Włochy	Catania	Centro di AdroTerapia e Applicazioni Nucleari Avanzate	2001
Japonia	Chiba	HIMAC (NIRS)	1994
Japonia	Gunma	Gunma University Heavy-Ion Medical Center	2009
Japonia	Hyogo	HIBMC	2001
Japonia	Kashiwa	Japanese National Cancer Center	1998
Japonia	Shizuoka	Shizuoka	2003
Japonia	Tsukuba	PMRC	2001
Japonia	Tsuruga	WERC (Wakasa Wan)	2002
Japonia	Fukui	Fukui Proton Cancer Center (FPCTF)	2009

Japonia	Fukushima	Southern Tohoku Research Institute for Neuroscience (STRIN)	2009
Japonia	Kagoshima	Medipolis Medical Research Foundation	2011
Japonia	Matsumoto	Aizawa hospital	2013
Japonia	Nagoya	Nagoya University	2012
Japonia	Tokio	Tokyo University	2013
Korea	Ilsan	Korean National Cancer Center	2007
Korea	Seul	Samsung Hospital	2014
Polska	Kraków	Instytut Fizyki Jądrowej PAN	2011
Polska	Kraków	IFJ PAN Centrum Cyklotronowe Bronowice	2015
Rosja	Dimitrovgrad	Federal High-Tech Medical Center	2013
Rosja	St Petersburg	Center of Nuclear Medecine	2016
Arabia Saudyjska	Riyadh	King Fahad Medical City	2015
RPA	Somerset West	iThemba	1993
Szwecja	Uppsala	Skandion Kliniken	2013
Szwajcaria	Villigen	Paul Scherrer Institut	1984
Tajwan	Tapei	Chang Gung Memorial Hospital (CGMH)	2012
USA	Boston	Massachusetts General Hospital Burr Proton Therapy Center	2001
USA	Hampton	Hampton University Proton Therapy Institute	2010
USA	Houston	MD Anderson Cancer Center	2006
USA	Jacksonville	University of Florida Proton Therapy Institute	2006
USA	Loma Linda	Loma Linda	1990

USA	Oklahoma City	ProCure Proton Therapy Center	2009
USA	Philadelphia	University of Pennsylvania Health System Roberts Proton Therapy Center	2009
USA	San Francisco	UCSF (UC Davis)	1994
USA	Sommerset	ProCure Proton Therapy Center	2012
USA	Warrenville	CDH Proton Therapy Center	2011
USA	Detroit	Mac Laren Hospital	2013
USA	Knoxville	Provision Center for Proton Therapy	2014
USA	New Brunswick	Robert Wood Johnson Medical Center	2013
USA	Rochester	Mayo Clinic	2014
USA	San Diego	SCRIPPS	2013
USA	Seattle	Seattle Cancer Care Alliance Proton Therapy, A ProCure Center	2013
USA	Shreveport	Willis-Knighton Cancer Center	2014
USA	St. Louis	Barnes-Jewish Hospital (Washington University)	2012

Rozdział 4

Stanowisko terapii protonowej w IFJ PAN w Krakowie

W Instytucie Fizyki Jądrowej PAN imienia H. Niewodniczańskiego w Krakowie powstało pierwsze w Polsce stanowisko terapii protonowej. Protony przyspieszane są do energii około 60 MeV za pomocą cyklotronu AIC-144. Energia ta jest wystarczająca, aby wiązka była wykorzystana do leczenia nowotworów oka. Wiazka jest transportowana jonowodami do pomieszczenia terapeutycznego i kształtowana tak, aby określona dawka została zdeponowana w obszarze guza nowotworowego. Pierwsi pacjenci zostali poddani napromieniowaniu w tym ośrodku w lutym 2011 roku [35].

4.1 Cyklotron AIC-144

Cyklotron jest to akcelerator kołowy, który służy do przyspieszania cząstek naładowanych. Jego częściami składowymi są elektromagnes, źródło jonów, system próżniowy a także elektrody przyspieszające - duanty. Dzięki polu magnetycznemu wytwarzanemu przez elektromagnes, jony poruszają się po orbitach kołowych i wielokrotnie przechodzą przez szczelinę, w której są przyspieszane przez pole elektryczne. Duanty sprzężone są z generatorem wysokiej częstotliwości. Cząstki poruszają się po okręgu z określoną częstotliwością. Z taką samą częstotliwością musi zmieniać się pole elektryczne, przyspieszające cząstki. Cyklotron znajdujący się w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, nosi nazwę AIC-144 (Rys. 4.1). Jest to cyklotron izochroniczny, co oznacza, że czas jednego obiegu cząstek jest stały. Podczas

przyspieszania cząstek dochodzi do relatywistycznego wzrostu masy przyspieszanych cząstek. Aby zniwelować ten efekt, pole magnetyczne jest silniejsze w części akceleratora położonej dalej od środka. Osiąga się to dzięki odpowiednio ukształtowanym wycięciom w rdzeniu elektromagnesu. Gdy protony uzyskają odpowiednią energię, transportowane są wewnątrz jonowodów do stanowiska terapeutycznego. Za pomocą magnesów wiązka jest odchylana we właściwym kierunku. Soczewki magnetyczne zapobiegają nadmiernemu poszerzeniu się wiązki. Gdy wiązka osiągnie już odpowiednią energię, wyprowadzana jest za pomocą elektrody odchylającej jonowodami do stanowiska terapeutycznego.

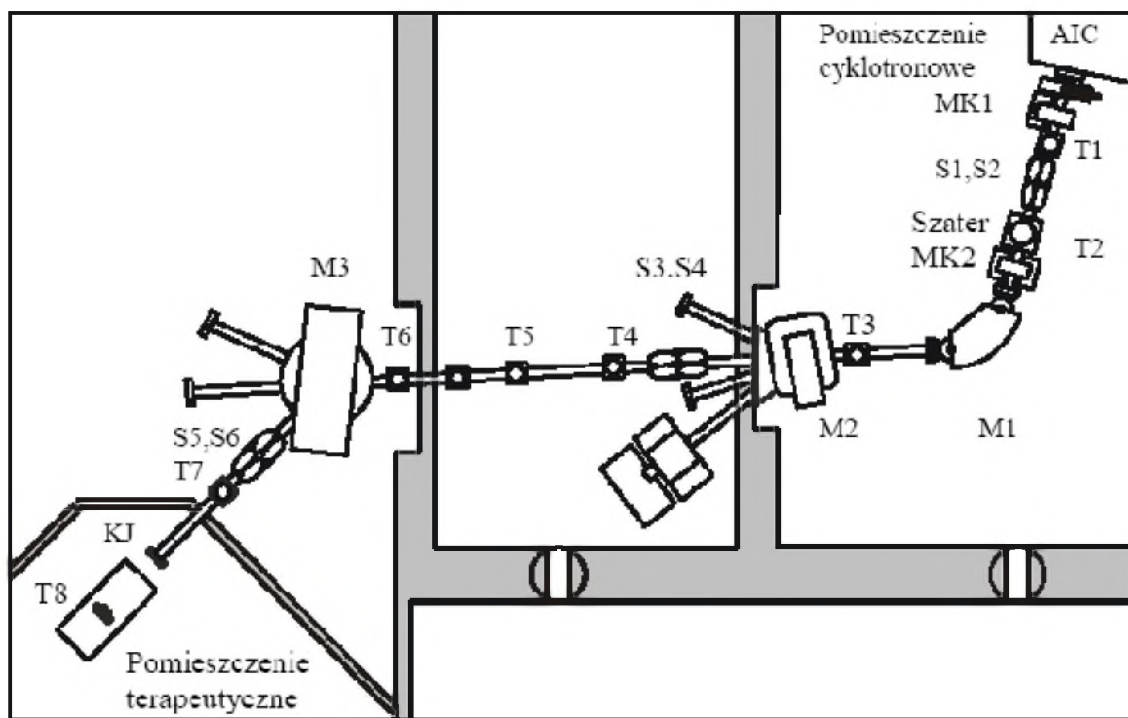


Rys. 4.1: Cyklotron izochroniczny AIC 144 [36]

4.2 System transportu wiązki

Na zamieszczonym poniżej schemacie (Rys. 4.2) zaznaczone są następujące elementy:

- szater- układ odcinający wiązkę,
- S1-S6- kwadropolowe soczewki magnetyczne, układ magnesów, który naprzemiennie skupia i rozprasza wiązkę, co umożliwia zmniejszenie jej przekroju,
- M1-M3 – magnesy odchylające wiązkę,
- MK1- MK2 - magnesy korygujące kierunek wiązki protonów,



Rys. 4.2: System transportu wiązki [37]

- T1 – T8 – tarcze pomiarowe,
- KJ – koniec jonowodu [38].

4.3 Stanowisko terapeutyczne

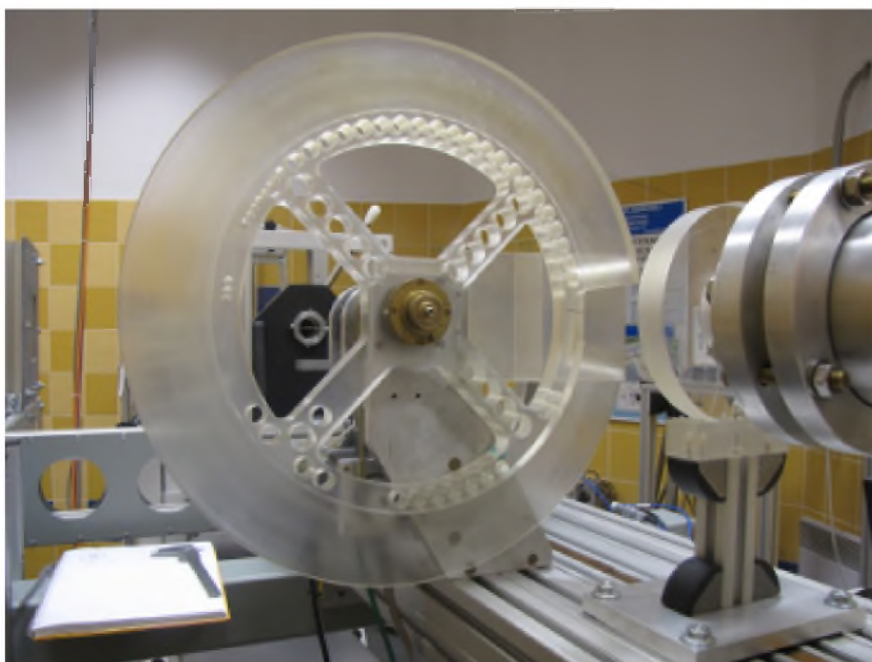
Na stanowisku terapeutycznym znajdują się elementy kształtujące wiązkę, a także komory jonizacyjne, których rolą jest monitorowanie wiązki.



Rys. 4.3: Stanowisko terapii protonowej [35]

4.3.1 Dyskryminator zasięgu

Maksymalny zasięg wiązki protonów w oku na stanowisku terapeutycznym przy IFJ PAN to około 30 mm. Gdy obszar napromieniany znajduje się na mniejszej głębokości, konieczne jest zmniejszenie energii protonów, tak aby pik Bragga pokrył się z miejscem występowania komórek nowotworowych. W tym celu stosuje się układ zmiany zasięgu wiązki. W skład dyskryminatora zasięgu wchodzi koło z pleksiglasu w kształcie klina (Rys. 4.4). Protony tracą energię podczas oddziaływania z warstwą pleksiglasu. Poprzez precyzyjny dobór grubości dyskryminatora można leczyć nowotwory położone na dowolnej głębokości, także mniejszej niż maksymalny zasięg protonów w oku.



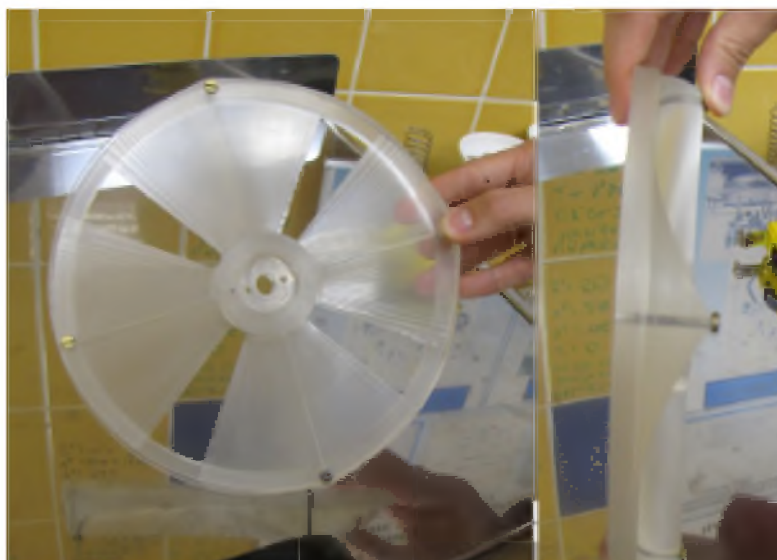
Rys. 4.4: Dyskryminator zasięgu.

4.3.2 Modulator zasięgu

W IFJ PAN w celu wytworzenia poszerzonego pików Bragga wykorzystuje się koła modulatoryjne, które obracają się w trakcie napromieniania (Rys. 4.5). Składają się one ze "schodków" o różnych grubościach. Po nałożeniu się dawek pochodzących od protonów, które przeszły przez różne warstwy, otrzymano dokładnie taki rozkład dawki, jaki jest potrzebny, aby w sposób jednorodny pokryć obszar napromieniany, czyli poszerzony pik Bragga. Modulator zasięgu jest projektowany indywidualnie dla każdego pacjenta, biorąc pod uwagę wymiary przestrzenne nowotworu. Jeżeli po jakimś czasie pojawi się pacjent wymagający takiego samego koła modulatoryjnego, będzie można wykorzystać już istniejący układ.

4.3.3 Komory jonizacyjne

Ważnymi przyrządami, które znajdują się na drodze wiązki protonów w pomieszczeniu terapeutycznym, są komory jonizacyjne, monitorujące wiązkę. Jedną z nich jest komora czterosegmentowa, dzięki której można sprawdzić, czy wiązka ma równomierny rozkład przestrzenny poprzez porównanie wskazań z poszczególnych segmentów. Z komorą czterosegmentową połączone są dwie współśrodkowe komory



Rys. 4.5: Modulator zasięgu.

pierścieniowe (Rys. 4.6). Wiązka przechodzi także przez komory przelotowe, które mierzą jej prąd. Na podstawie tego pomiaru obliczana jest całkowita dawka, dostarczona w obszar guza.

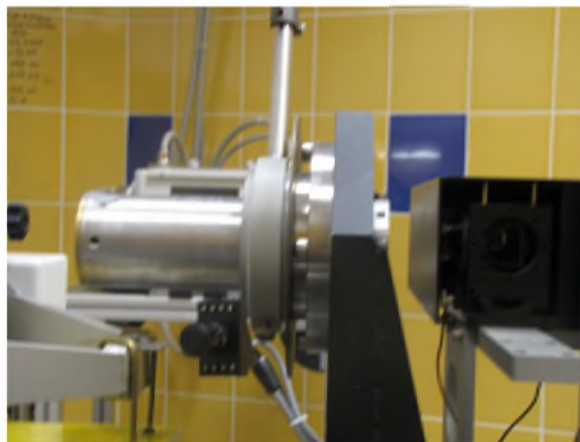


Rys. 4.6: Komora czterosegmentowa i dwupierścieniowa oraz komory przelotowe [26].

4.3.4 Kolimator

Końcowym elementem toru kształtowania wiązki jest kolimator, który wycina fragment wiązki odpowiadający obrysowi guza (Rys. 4.7). Jest to kolejny element,

produkowany indywidualnie dla każdego pacjenta. Zadaniem kolimatora jest ochrona zdrowych komórek przed napromieniowaniem.



Rys. 4.7: Kolimator końcowy.

Po przejściu przez urządzenia kształtujące i monitorujące wiązkę, protony wpadają do oka. Bardzo ważne dla powodzenia leczenia jest dokładne unieruchomienie pacjenta, dlatego w pomieszczeniu terapeutycznym znajduje się specjalny fotel terapeutyczny (Rys. 4.8). Umożliwia on zainstalowanie ramy, do której wkładana jest maska unieruchamiająca głowę pacjenta. W celu uzyskania precyzji położenia, pacjent trzyma w ustach specjalny gryzak unieruchamiający. Ponadto, podczas leczenia wzrok pacjenta skierowany jest na ściśle określony punkt, w którym znajduje się świecąca dioda. Aby uzyskać możliwość sprawdzenia, czy obszar napromieniany znajduje się w odpowiednim miejscu, na gałkę oczną naszywa się w okolicy guza specjalne klipsy tantalowe. Bezpośrednio przed napromienianiem wykonuje się dwa zdjęcia rentgenowskie w kierunkach wzajemnie prostopadłych, na których markery tantalowe są widoczne. W ten sposób uzyskuje się informację na temat położenia komórek nowotworowych. Schemat procesu napromieniania przedstawiony jest na rysunku 4.9.

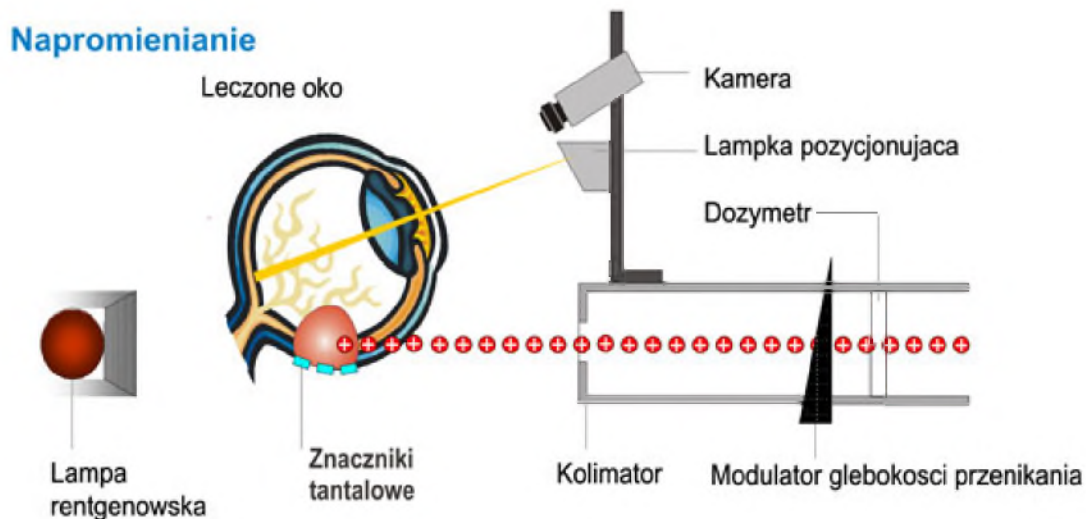
Proces napromieniania zilustrowany jest na schemacie 4.9. Zadaniem pacjenta jest obserwacja światła, tak, aby gałka oczna ustawiona była w ściśle określony sposób. Kamera umożliwia pracownikom obserwację oka pacjenta. Ponadto na schemacie widoczna jest jedna z dwóch lamp rentgenowskich, służących do kontroli pozycjonowania pacjenta. Wiązka protonów zaznaczona jest w postaci czerwonych kół ze znakiem +. Lampka pozycjonująca emituje światło, na które pacjent patrzy



Rys. 4.8: Fotel pacjenta [27].

w trakcie napromieniania, co zapewnia właściwe ustawienie gałki ocznej.

Zanim pacjent zostanie poddany procesowi napromieniania, zespół IFJ PAN wykonuje pomiar rozkładu dawki. Płasko- równoległa komora jonizacyjna umieszczona jest wewnątrz fantomu wodnego, który imituje ciało pacjenta. Następnie detektor przesuwa się wzdłuż osi wiązki, rejestrując dawkę dla różnych głębokości (Rys. 4.10).



Rys. 4.9: Napromienianie pacjenta wiązką protonów. Na schemacie zaznaczono lampkę pozycjonującą i kamerę. [26].



Rys. 4.10: Pomiar rozkładu dawki w fantomie wodnym [26].

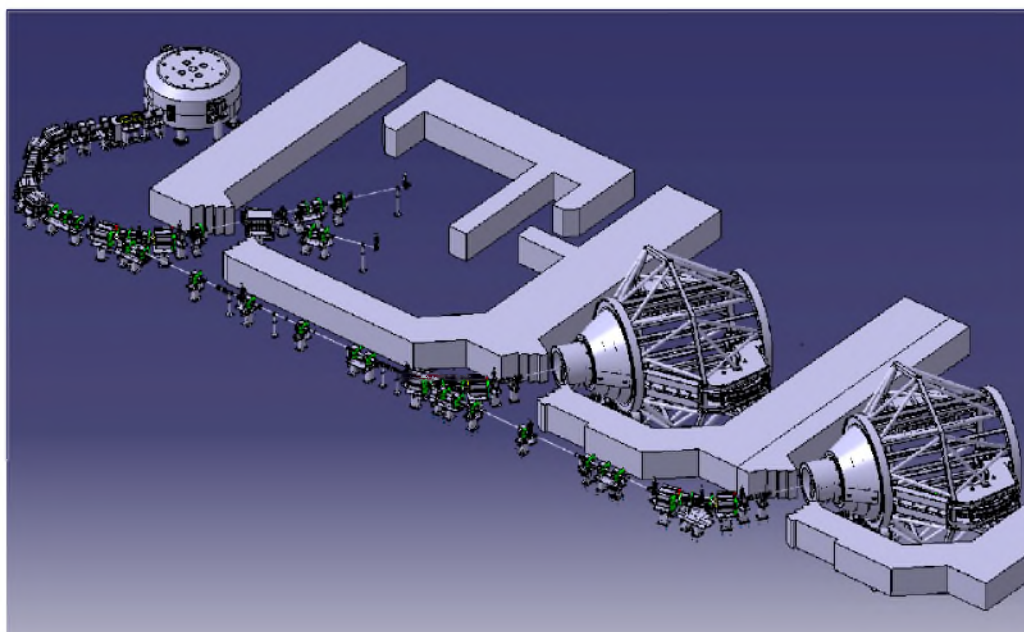
4.4 Cyklotron Proteus C-235

W 2012 roku w IFJ PAN został zainstalowany drugi cyklotron, Proteus C-235 (Rys. 4.11). Wyprodukowany został przez belgijską firmę Ion Beam Application. Maksymalna energia protonów przyspieszanych w tym cyklotronie to 230 MeV, dzięki czemu możliwe jest leczenie nowotworów położonych na większych głębokościach, niż za pomocą cyklotronu AIC-144. Protony o takiej energii stosowane są do lecze-

nia np. nowotworów mózgu, rdzenia kręgowego i prostaty. Cyklotron ten znajduje również zastosowanie w badaniach naukowych z dziedzin, takich jak fizyka jądrowa, dozymetria i fizyka medyczna [12]. Nowe stanowisko terapeutyczne wyposażone jest w gantry, co pozwala na napromienianie pacjenta z różnych kierunków i osiągnięcie bardzo korzystnego rozkładu dawki w ciele pacjenta. Uroczyste otwarcie CCB odbyło się 15.10.2015. Centrum wyposażone jest w dwa stanowiska gantry oraz stanowisko terapii oka (rys. 4.12).



Rys. 4.11: Cyklotron Proteus C-235 [26].



Rys. 4.12: Schemat prowadzenia wiązki w Centrum Cyklotronowym Bronowice IFJ PAN [28]

Rozdział 5

GEANT4

5.1 Symulacje komputerowe

Symulacje komputerowe są współcześnie użytecznym narzędziem fizyki. Ich zadaniem jest odzwierciedlanie przebiegu rzeczywistego doświadczenia dzięki programom komputerowym, wykorzystującym modele matematyczne badanego zjawiska. Umożliwiają one zebranie danych w sytuacjach, gdy wykonanie eksperymentu nie jest możliwe, na przykład badanie ewolucji gwiazd lub wyznaczanie przebiegu zderzenia ciężkich jonów przy wysokich energiach. Symulacje mogą pomóc, gdy eksperyment jest kosztowny i trudny do wykonania. W przypadku skomplikowanych doświadczeń, wyniki obliczeń pomagają zaprojektować stanowisko pomiarowe, dobrać odpowiedni sprzęt a także przewidzieć prawdopodobny przebieg zjawisk. Cennych informacji dostarcza porównanie wyników symulacji z danymi doświadczalnymi. W ten sposób można przekonać się, czy model wykorzystany w obliczeniach zgodny jest z rzeczywistością. Poza fizyką symulacje wykorzystywane są w wielu dziedzinach, takich jak ekonomia, biznes, nauki społeczne, meteorologia, ochrona środowiska, budownictwo, matematyka a także w rozrywce (gry komputerowe).

5.2 Metoda Monte Carlo

Metoda Monte Carlo jest to klasa algorytmów obliczeniowych, wykorzystywana w symulacjach procesów o charakterze losowym. Pozwala ona na badanie zjawisk, nawet wtedy, gdy nie są znane równania ściśle je określające. Wykorzystywana jest

w symulacjach komputerowych z dziedziny matematyki, fizyki i biologii, a także w ekonomii, gdy trzeba uwzględnić ryzyko w biznesie. Poprzez wielokrotne powtarzanie niezależnych symulacji procesu otrzymuje się wiele wartości, dzięki którym można obliczyć szukaną wielkość jako ich średnią arytmetyczną. W symulacjach z wykorzystaniem pakietu GEANT4 zastosowanie znajduje metoda akceptacji - odrzuceń [16]. Celem jest obliczenie zmiennej x , która należy do przedziału $[x_1, x_2]$ o znormalizowanym rozkładzie prawdopodobieństwa danym wzorem:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n N_i f_i(x) g_i(x). \quad (5.1)$$

W powyższym równaniu N_i są liczbami większymi od zera, a $f_i(x)$ to znormalizowane funkcje gęstości prawdopodobieństwa w przedziale $[x_1, x_2]$. Symbol $g_i(x)$ oznacza dystrybuanty zmiennej losowej x . Dystrybuanty te przyjmują wartości z przedziału $< 0, 1 >$.

Aby obliczyć zmienną x , należy:

1. Wybrać w sposób losowy liczbę naturalną $i \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$, z prawdopodobieństwem proporcjonalnym do N_i .
2. Wybrać wartości x_0 dla rozkładu $f_i(x)$.
3. Obliczyć $g_i(x)$ oraz przyjąć, że $x = x_0$ z prawdopodobieństwem $g_i(x_0)$.
4. Jeśli x_0 zostało odrzucone, procedurę należy powtórzyć [18].

Zaletami metody Monte Carlo jest możliwość rozwiązania wielu złożonych problemów bez użycia skomplikowanej teorii. Jej stosowanie ułatwione jest dzięki rosnącej mocy obliczeniowej komputerów. Do wad należy zaliczyć fakt, że wynik zawsze jest pewnym przybliżeniem, uzależnionym od liczby prób i jakości generatora liczb pseudolosowych [19].

5.3 GEANT4

GEANT4 jest to oprogramowanie, umożliwiające symulacje oddziaływania cząstek z materią. Nazwa jest akronimem angielskich słów GEometry ANd Tracking. GEANT4 został utworzony przez wielu specjalistów z dziedziny fizyki, matematyki i chemii, dzięki współpracy dwóch wielkich ośrodków naukowych, CERN i KEK.

Na początku zadaniem naukowców było ulepszenie istniejących już bibliotek GEANT3 napisanych w języku Fortran. W trakcie pracy okazało się jednak, że lepiej będzie stworzyć zupełnie nowe środowisko, wykorzystujące możliwości programowania obiektowego w języku C++. Jego zadaniem była symulacja zjawisk z dziedziny fizyki wysokich energii, z wykorzystaniem całej ówczesnej wiedzy na temat przebiegu procesów fizycznych. W dalszej kolejności rozszerzono biblioteki, dzięki czemu pakiet GEANT4 może być z powodzeniem stosowany w różnych dziedzinach, jak np. fizyka medyczna. GEANT4 jest oprogramowaniem darmowym, przystosowanym do pracy zarówno z systemami Unix i Linux, jak i Windows. Typy zmiennych występujące w języku C++ mają swoje odpowiedniki w GEANT4. Aby zdefiniować zmienną w programie symulacyjnym, przed nazwą typu dodajemy przedrostek G4. W odróżnieniu od typowych zmiennych języka C++, zmienna wykorzystywana w symulacjach posiada informację na temat jednostki. Przykładowo `G4int r= 4*mm` oznacza zmienną typu całkowitego i wartości 4 mm. Pozostałe komendy wykorzystane w pakiecie GEANT4 mają składnię identyczną jak w języku C++, biblioteki dodawane są za pomocą funkcji `#include`, a funkcję główną programu oznaczona jest słowem `main()`. W skład funkcji głównej powinien wchodzić domyślny manager uruchamiający pozostałe części programu, którym jest w tym przypadku obiekt o nazwie `RunManager`. Kontroluje on działanie całego programu i posiada informacje na temat symulowanych procesów fizycznych, a także cząstek, biorących udział w badanym zjawisku.

Ważnym składnikiem oprogramowania jest generator liczb pseudolosowych oraz bazy danych, zawierające przekroje czynne na procesy fizyczne, zachodzące podczas przechodzenia cząstek przez materię. Użyteczną cechą oprogramowania jest możliwość wizualizacji, co pozwala na łatwiejsze wychwycenie ewentualnych błędów w geometrii a także ciekawsze prezentowanie wyników symulacji.

Pakiet ten umożliwia odtworzenie dowolnej geometrii układu, dzięki możliwości wprowadzania prostych brył (na przykład kuli, prostopadłościanu lub walca), a także korzystania z operacji logicznych, takich jak suma, część wspólna i różnica. Można także definiować dowolne kształty za pomocą ograniczających je wycinków płaszczyzny. Wszystkie obiekty, występujące w symulacji, znajdują się wewnątrz bryły o nazwie `World` (świat). Dla każdego obiektu określa się położenie, podając współrzędne w układzie kartezjańskim. Użytkownik ma także możliwość umiejscowienia jednego obiektu wewnątrz drugiego.

Utworzone obiekty trzeba wypełnić określonym materiałem. Klasa `G4Element` służy do określania liczby atomowej i masowej pierwiastka, natomiast klasa `G4Material` pozwala na wybór odpowiednich parametrów, takich jak gęstość, ciśnienie, temperatura lub stan skupienia. Związki chemiczne oraz mieszaniny definiuje się poprzez podanie proporcji pomiędzy poszczególnymi składnikami. Użytkownik ma duży wpływ na parametry źródła cząstek. We wszystkich programach, opisanych w tej pracy, cząstkami emitowanymi przez źródło są protony, jednak dla potrzeb symulacji związanych z fizyką medyczną często stosowane są fotony lub jony węgla. Użytkownik określa także rozkład energetyczny wiązki. Istnieje szeroki wachlarz możliwości: energia może przyjąć pojedynczą wartość (wiązki monoenergetyczne), może też być opisana rozkładem normalnym, jednorodnym albo być zdefiniowana histogramem lub inną określoną przez użytkownika funkcją. Trzeba także określić za pomocą współrzędnych kartezjańskich miejsce, z którego cząstki są emitowane, a także kierunek i zwrot wektora prędkości.

Podczas pisania programu można zdecydować, jakie procesy fizyczne będą symulowane poprzez wybór pakietów oddziaływań, które chcemy uwzględnić. Na przykład można wybrać, że cząstki mają ulegać efektowi Comptona i fotoelektrycznemu, a także elastycznym i nieelastycznym oddziaływaniom jądrowym.

Użytkownik decyduje też o dokładności symulacji, wybierając średnią drogę swobodną i parametr cięcia (*cut value*). Niektóre procesy elektromagnetyczne wymagają progu, po którym cząstki wtórne nie są już produkowane. Ten próg zdefiniowany jest jako odległość, która jest przeliczana na energię dla każdego materiału. Im jest on mniejszy, tym większa jest liczba cząstek wtórnych i czas obliczeń rośnie, za to zwiększa się dokładność symulacji.

Trzeba także zdefiniować w programie detektory, czyli elementy geometrii, które mogą rejestrować zarówno cząstki wiązki pierwotnej, jak i cząstki powstające w wyniku procesów oddziaływania z materią. Mogą one przesyłać wartość zdeponowanej energii do pliku wynikowego, który następnie podlega opracowaniu w celu uzyskania interesujących zależności [22, 29].

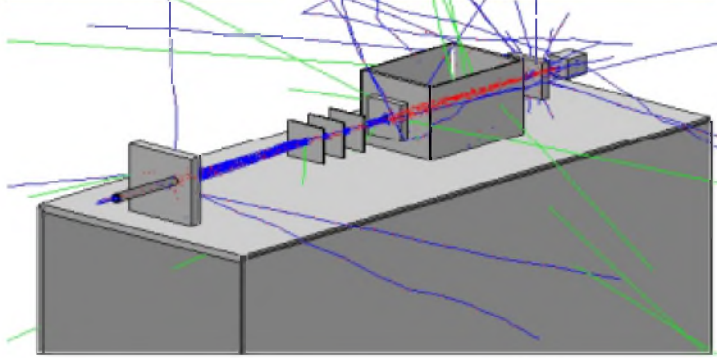
Rozdział 6

Przykłady zastosowania GEANT4 do obliczania rozkładu dawki w różnych ośrodkach terapii protonowej

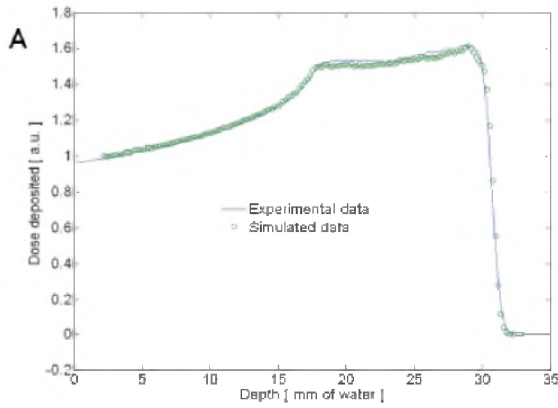
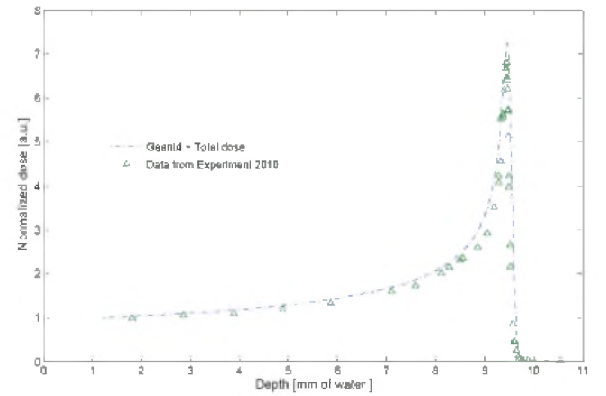
6.1 Stanowisko CATANA we Włoszech

W Laboratori Nazionali del Sud w Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (LNS-INFN) w Catanii, w 2002 roku, powstało pierwsze we Włoszech stanowisko terapii protonowej o nazwie CATANA (Centro di AdroTerapia ed Applicazioni Nucleari Avanzate). Do leczenia nowotworów o nazwie CATANA wykorzystywana jest tam wiązka protonów o energii 62 MeV. Aby zbadać zjawiska zachodzące w trakcie napromieniania, utworzono program symulacyjny wykorzystujący pakiet Geant4 o nazwie Hadrontherapy. Podstawowa wersja tego programu dołączona jest do oficjalnej dystrybucji bibliotek GEANT4. Pozwala on na symulację elementów toru wiązki dla stanowiska terapii protonowej i węglowej oraz obliczenie między innymi głębokościowego rozkładu dawki oraz fluencji w testowym fantomie (Rys. 6.1). Bardziej rozbudowana wersja umożliwia uzyskanie trójwymiarowych rozkładów fluencji protonów, dawki oraz LET dla wiązki pierwotnej i wiązek wtórnych. Wyniki otrzymane z pełnej wersji programu są porównane z pomiarem dozymetrycznym [30, 31]. Program symuluje wszystkie niezbędne elementy geometrii, stosowane w terapii w biernym systemie

kształtowania wiązki: układ rozpraszający i modulujący wiązkę, kolimatory, komory jonizacyjne, przez które przechodzi wiązka a także detektory do zbadania przestrzennego rozkładu dawki. Uwzględnione są też wszystkie istotne oddziaływania, takie jak straty energii na skutek oddziaływań elektromagnetycznych, wielokrotne rozprószania kulombowskie oraz oddziaływania jądrowe. Zarówno wariant geometrii, jak i model oddziaływań może być zmieniony przez użytkownika. Źródło jonów ma rozkład przestrzenny normalny o odchyleniu standardowym 1 mm, natomiast energia wiązki jest opisana rozkładem Gaussa o odchyleniu standardowym 0,3%. Nie symulowano wiązki rozbieżnej, pozostając w zgodzie ze specyfikacją cyklotronu. Zarówno dla wiązki protonów, jak i jonów węgla dane symulacyjne zostały porównane z pomiarem wykonanym w INFN-LNS w Catanii (Rys. 6.2). Sześcienny fantom został podzielony na 4000 warstw o szerokości 10 μm każda, ułożonych prostopadle do osi wiązki. Pomiary wykonane były z użyciem płaskiej komory jonizacyjnej w sześciennym fantomie wodnym. Odległości między poszczególnymi punktami pomiarowymi to 50 μm . Rozkłady dawki uzyskane dzięki symulacjom komputerowym wykazały dobrą zgodność z pomiarami dozymetrycznymi.

A**B**

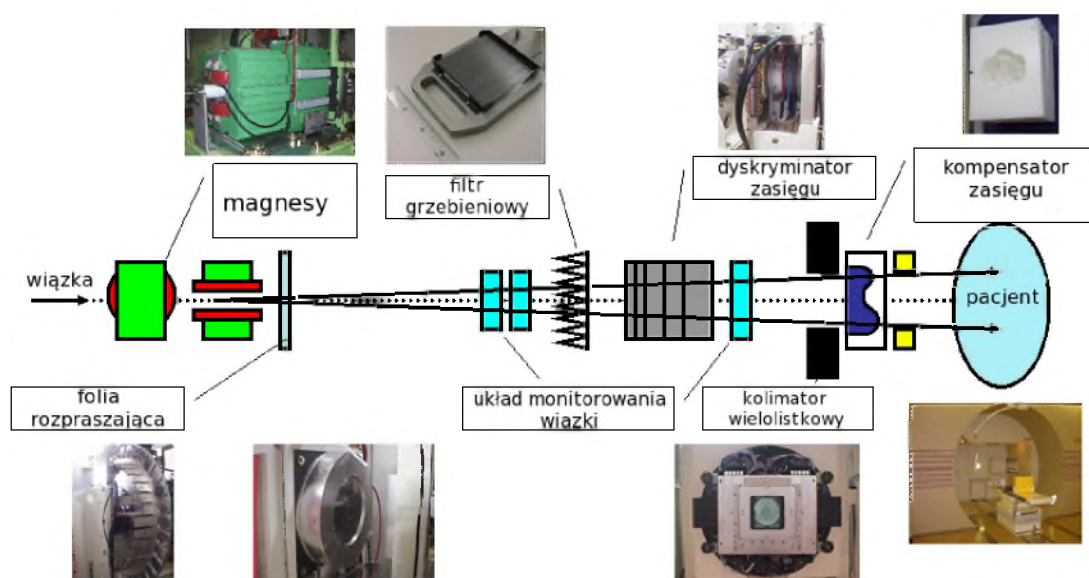
Rys. 6.1: Stanowisko terapii hadronowej w Catani (A) oraz geometria programu symulacyjnego (B) [32].

**B**

Rys. 6.2: Poszerzony pik Bragga dla protonów (A) oraz pik Bragga dla jonów węgla (B) uzyskane za pomocą symulacji oraz pomiarów [30].

6.2 Symulacje dla ośrodków terapii protonowej w Japonii

Japonia jest krajem wysoko rozwiniętym technologicznie, w którym znajduje się obecnie 13 stanowisk terapii protonowej [24]. W Hyogo Ion Beam Medical Center (HIBMC) oraz National Cancer Center (NCC) wykorzystywany jest pakiet GEANT4 w celu przetestowania różnych planów leczenia i wybrania najwłaściwszego. Schemat programu symulacyjnego oraz zdjęcia urządzeń, znajdujących się na drodze wiązki protonów znajdują się na rysunku 6.3

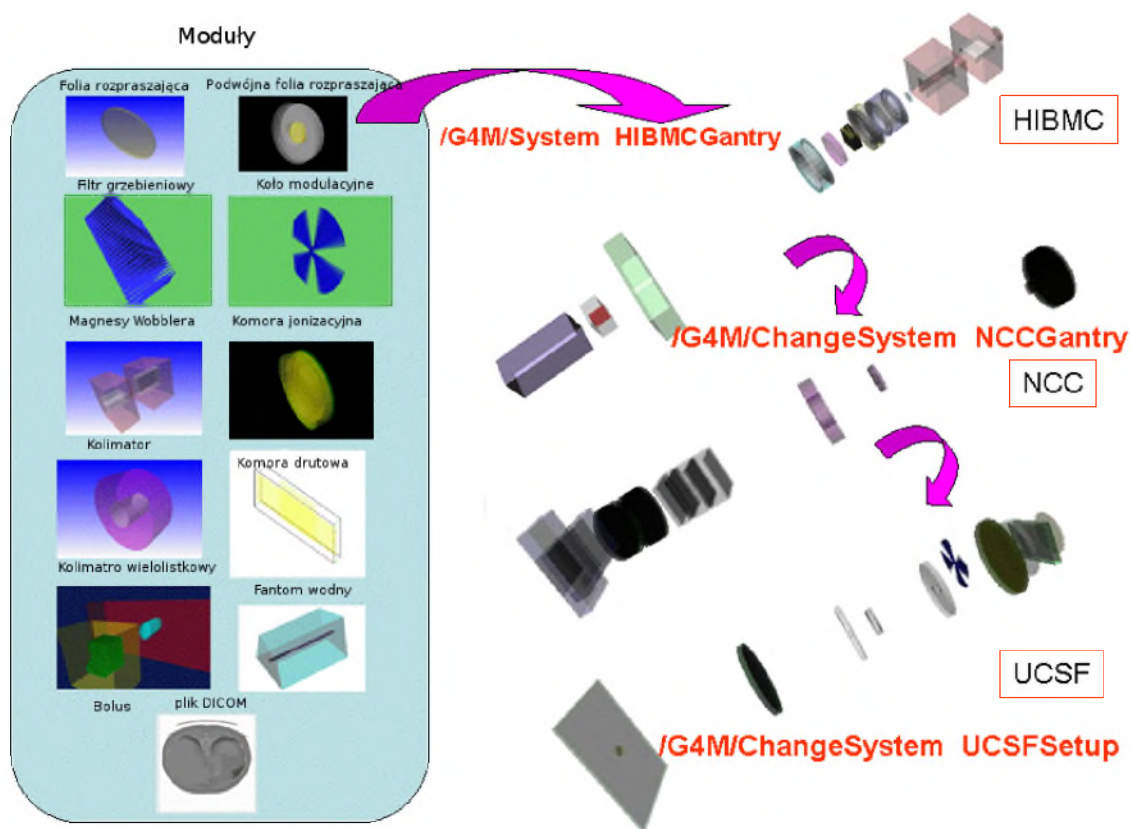


Rys. 6.3: Schemat programu symulacyjnego oraz zdjęcia rzeczywistych elementów kształtujących wiązkę protonów [33].

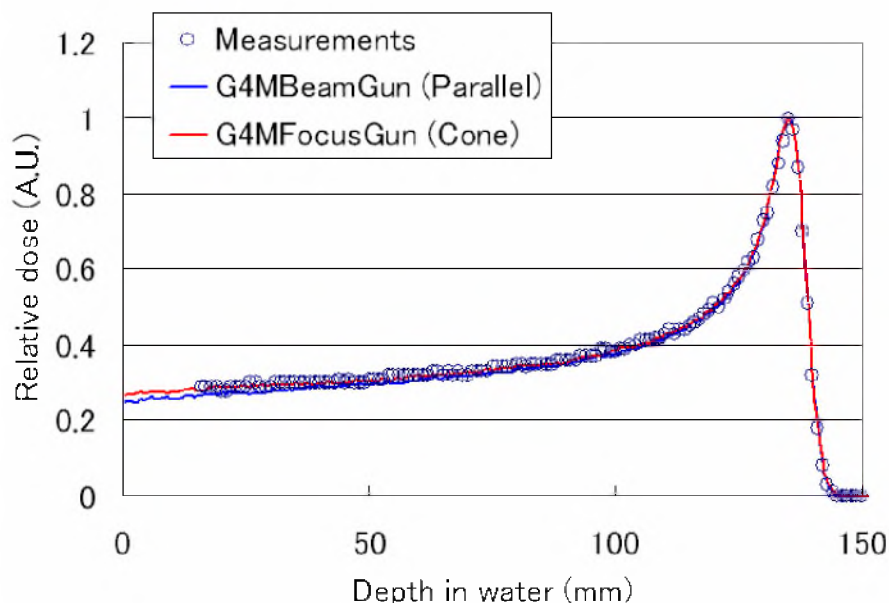
Symulacje komputerowe porównywane są z pomiarami piku Bragga oraz poszerzonego piku Bragga. Ponieważ oba ośrodki wyposażone są w gantry, struktura programu umożliwia napromieniowanie z różnych kierunków. Użytkownik może zmienić geometrię programu. Wiązka jest poszerzana za pomocą magnesów Wobblera oraz filtrów wygładzających, tak, aby uzyskany został jednorodny profil, a następnie wiązka jest monitorowana przez komory jonizacyjne. Poszerzony pik Bragga jest uzyskiwany dzięki specjalnemu filtrowi w kształcie grzebienia (ridge filter). Dopasowanie obszaru występowania największej dawki do kształtu guza możliwe jest dzięki zastosowaniu modulatora zasięgu i kolimatora wielolistkowego, a także

kompensatora zasięgu [33]. W programie zostały zaimplementowane trzy systemy napromieniania: stanowiska zawierające gantry w Hyogo Ion Beam Medical Center (HIBMC), oraz w National Cancer Center (NCC). Ponadto w programie można przeprowadzić symulacje dla stanowiska terapii protonowej przy University of California San Francisco (UCSF). Zmienianie geometrii programu może być dokonane także przez osobę nie posiadającą dużej wiedzy z dziedziny programowania, dzięki zastosowaniu odpowiedniego interfejsu użytkownika (Rys. 6.4).

Na rysunku 6.5 zamieszczono zestawienie danych pomiarowych z danymi symulacyjnymi uzyskanymi dwoma różnymi metodami: dla wiązki równoległej i dla wiązki w kształcie stożka. Zgodność symulacji i eksperymentu jest bardzo dobra, co świadczy o prawidłowym działaniu bibliotek GEANT4.



Rys. 6.4: Schemat przedstawiający różne możliwe do wyboru warianty geometrii programu symulacyjnego [33].

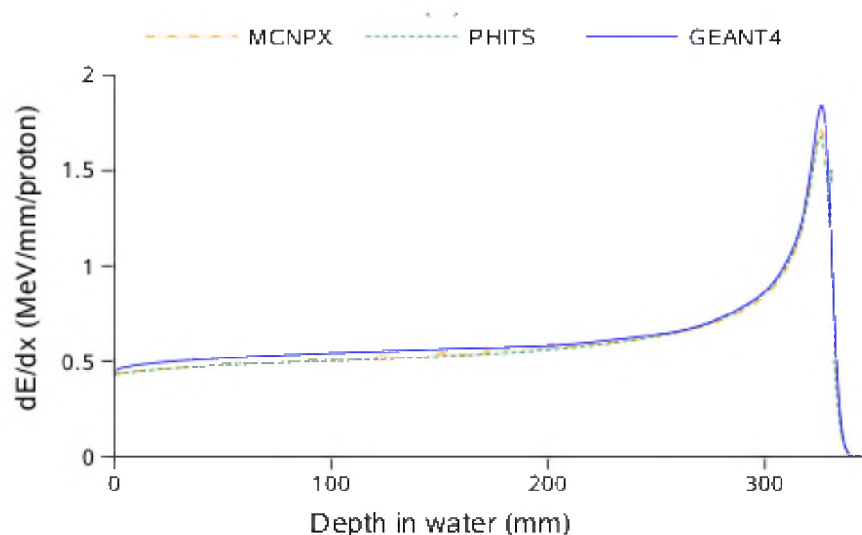


Rys. 6.5: Rozkład dawki na głębokości zmierzony w National Cancer Center w Japonii (puste koła) oraz uzyskany za pomocą symulacji. Kolorem czerwonym oznaczone są symulacje dla wiązki stożkowej, a kolorem niebieskim- dla równoległej [33].

6.3 Optymalizacja parametrów symulacji dla terapii protonowej

Grupa naukowców, pracująca na uniwersytecie w Lyonie wraz z współpracownikami sprawdzała, jakie znaczenie mają różne parametry w symulacjach dotyczących terapii protonowej z wykorzystaniem pakietu Geant4. Uzyskane wyniki zestawiono z danymi z systemu planowania leczenia. W pracy pod tytułem *"Optimization of GEANT4 based simulation for proton therapy"* skupiono się na technice PBS (Pencil Beam Scanning), która pozwala na zastosowanie IMPT (Intensity Modulated Proton Therapy). Wyniki symulacji za pomocą pakietu GEANT4 dla różnych energii i głębokości zostały porównane z symulacjami wykonanymi z użyciem kodów PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) i MCNPX (Monte Carlo N-Particle eXtended) (Rys. 6.6).

Różnice w symulacjach za pomocą kodu GEANT4 i pozostałymi kodami można wytłumaczyć innymi modelami oddziaływań jądrowych i elektromagnetycznych. Całkowita energia zdeponowana przez monoenergetyczną wiązkę o energii 230 MeV w wodzie wynosi 215.5 MeV/proton w GEANT4, 204.7 MeV/proton w PHITS i

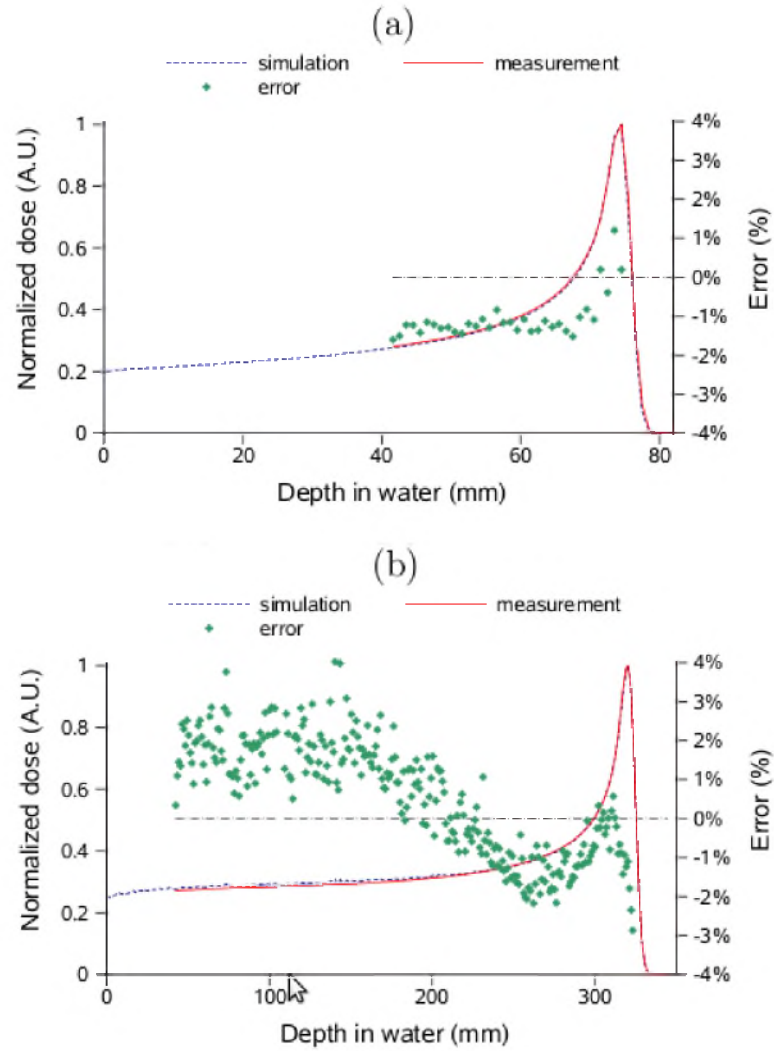


Rys. 6.6: Zależność rozkładu głębokościowego dawki dla protonów o energii 230 MeV w wodzie uzyskana za pomocą kodów GEANT4, MCNPX i PHITS [34].

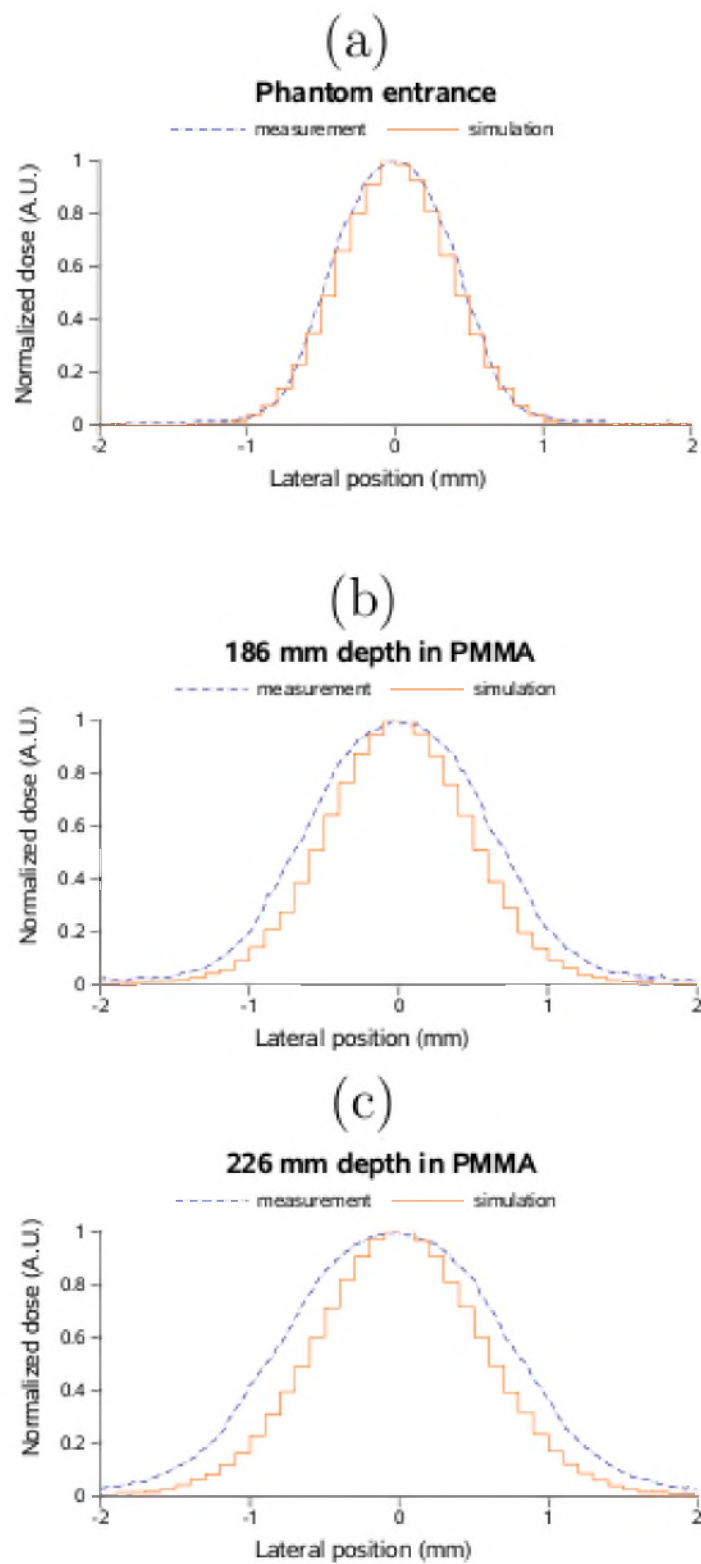
205.6 MeV/proton w MCNPX.

Symulacje porównane zostały z danymi doświadczalnymi uzyskanymi z ośrodka terapii protonowej w Essen w Niemczech. Pomiar wykonywany był za pomocą komory jonizacyjnej do pomiaru piku Bragga oraz filmu radiochromicznego. Średnia rozbieżność pomiarów i symulacji to ok 1% (Rys. 6.7).

Przeprowadzono także symulacje profilu poprzecznego wiązki. Profile rejestrowane były w fantomie zbudowanym z PMMA (Rys. 6.8). Porównanie uzyskanych wyników z pomiarem wykazało, że symulacja nie oddaje zgodnie z rzeczywistością poszerzania się wiązki w ośrodku. Jest to konsekwencją niedoskonałości zastosowanych bibliotek [34].



Rys. 6.7: Porównanie pomiędzy zmierzonymi i symulowanymi rozkładami dawki na głębokości dla wiązki o energii 98,71 MeV (a) i 227,65 MeV (b). Zielonymi punktami oznaczono względny błąd dla każdego punktu [34].



Rys. 6.8: Profile poprzeczne dla wiązki o energii 210,56 MeV na różnych głębokościach w fantomie z PMMA [34].

Rozdział 7

Porównanie symulacji z danymi pomiarowymi

Aby określić, czy program symulacyjny jest oparty na właściwych założeniach, konieczne jest porównanie danych, uzyskanych za pomocą symulacji, z danymi pomiarowymi. Podczas przeprowadzania obliczeń konieczne jest dokonywanie uproszczeń, jednak program zbyt mało złożony nie daje wyników zgodnych z rzeczywistością. Pomiarы dozymetryczne rozkładów dawki na głębokości wykonywane były w fantomie wodnym za pomocą płasko-równoległej komory jonizacyjnej Markus (typ 23343), natomiast profil wiązki mierzony był w powietrzu, za pomocą diod prostowniczych.

Najprostszym sposobem na zbadanie wiarygodności programu symulacyjnego jest obliczenie, o ile procent średnio dane symulacyjne różnią się od pomiaru. Za pomocą arkusza kalkulacyjnego dla każdej głębokości obliczana była różnica pomiędzy dawką względną zmierzoną (P_i) a uzyskaną za pomocą symulacji (S_i). Wartość ta była dzielona przez dawkę względną zmierzoną (wzór 7.1).

$$\Delta_i = \frac{|S_i - P_i|}{P_i}. \quad (7.1)$$

Kolejnym krokiem było obliczenie średniej różnicy dla wszystkich głębokości Δ_i (wzór 7.2).

$$\Delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i. \quad (7.2)$$

Niepewność pomiaru, mniejsza niż 1% jest zanedbywalnie mała w porównaniu

z błędem systematycznym, wynikającym z niezbędnych uproszczeń, jakie zawiera program symulacyjny [41]. Błąd statystyczny symulacji komputerowych nie odgrywa istotnej roli i nie jest uwzględniany, gdyż minimalizowany był poprzez zwiększanie liczby cząstek wiązki.

Gdy symulacje różnią się od wartości zmierzonych o 5% lub mniej, można uznać, że program symulacyjny odzwierciedla zjawiska zachodzące na stanowisku terapeutycznym z zadowalającą dokładnością. Sytuacja taka występuje dla programu symulującego rozkład dawki na głębokości, który uwzględniał wszystkie urządzenia pomieszczenia terapeutycznego, mające znaczący wpływ na rozkład dawki, a także istotne oddziaływania (reakcje z powłokami elektronowymi i jądrowe). Różnice procentowe między symulacją a pomiarem zawierają się w przedziale od 5,3% do 0,0%, przy czym średnia to 1,1 %.

Symulacje profilu poprzecznego wiązki różnią się od danych pomiarowych średnio o 5,3%. Największe różnice występują dla obszaru dużego gradientu dawki, na brzegu pola napromieniania. Błąd procentowy jest zazwyczaj największy dla obszarów, gdzie zmierzona dawka względna jest mała, ponieważ stosunkowo niewielkie bezwzględne różnice między symulacją a pomiarem przekładają się na duże różnice procentowe. Przykładowo w obszarze, gdzie wartość dawki względnej przekracza 0,7, odchylenie symulacji od danych pomiarowych wynosi 3,4%, a w odległości 20,5 mm od osi wiązki- 59% i 27%. Ponadto w obszarze dużego gradientu dawki, zaniebdywalna zazwyczaj niepewność położenia detektora ma większe znaczenie, niż w obszarze, gdzie dawka narasta lub opada powoli. Pewną rolę odgrywa tu też fakt, że wiązka rzeczywista nie jest idealnie symetryczna, w odróżnieniu od wiązki uzyskanej komputerowo.

Symulacje poszerzonego piku Bragga różnią się od pomiaru średnio o 4,1 %. Największe różnice, do 49% występują w obszarze spadku dawki za pikiem Bragga. Podobnie jak w przypadku symulacji profilu wiązki, przyczyną jest niewielka wartość dawki względnej pomiarowej, przez którą dzieli się różnicę między dawką względną zmierzoną a obliczoną.

Nie ma możliwości napisania takiego programu, który uwzględniałby dokładnie wszystko, co dzieje się na stanowisku terapeutycznym i dawałby rezultat identyczny z pomiarem. Uproszczenia są niezbędnym krokiem podczas tworzenia symulacji. Mimo wszystko, oprogramowanie GEANT4 umożliwia użytkownikowi stworzenie programu, który opisuje procesy z dobrym przybliżeniem i zadowalającą dokładnością,

dostarczając wielu cennych informacji na temat badanego procesu fizycznego oraz umożliwiając wyciągnięcie poprawnych wniosków.

Rozdział 8

Geometria i materiały programu symulacyjnego

8.1 Definicje materiałów

W programie symulacyjnym można z dużą swobodą definiować potrzebne materiały, jakimi wypełnione są bryły, wchodzące w skład symulowanego świata. Pierwszym krokiem jest określenie pierwiastków poprzez podanie ich liczby atomowej i masowej. Najważniejsze pierwiastki, znajdujące się na stanowisku terapii protonowej, które są uwzględnione w programie, to wodór, węgiel, tlen, aluminium, argon, miedź, cynk, cyna i tantal. Liczba masowa i atomowa zostały pobrane z układu okresowego.

Aby utworzyć bardziej złożone materiały, trzeba podać ilość i rodzaj składników, a także proporcje, jakie mają być zachowane między liczbami poszczególnych atomów. W programach symulacyjnych wykorzystano następujące materiały:

- woda - H_2O , o gęstości 1 g/cm^3 ;
- powietrze- w programie składa się w 78% azotu, 21% tlenu i 1% argonu, ma gęstość $0,0012\text{ g/cm}^3$;
- PET- na każde dziesięć atomów węgla przypada osiem atomów wodoru i cztery atomy tlenu (gęstość $1,27\text{ g/cm}^3$);
- kapton- składa się z węgla, wodoru, tlenu i azotu w proporcjach 22:10:5:2, a jego gęstość to $1,42\text{ g/cm}^3$;

- PMMA- na każde 5 atomów węgla przypada 8 atomów wodoru i 2 atomy tlenu, gęstość to $1,18 \text{ g/cm}^3$;
- polietylen (PE)- składa się z węgla i wodoru w proporcjach 1:2, gęstość: $2,76 \text{ g/cm}^3$;
- Mosiądz- składa się w 69% z miedzi, w 30% z cynku i w 1% z cyny, o gęstości $8,5 \text{ g/cm}^3$;
- Tantal- gęstość $16,650 \text{ g/cm}^3$;
- Aluminium- gęstość $2,7 \text{ g/cm}^3$.

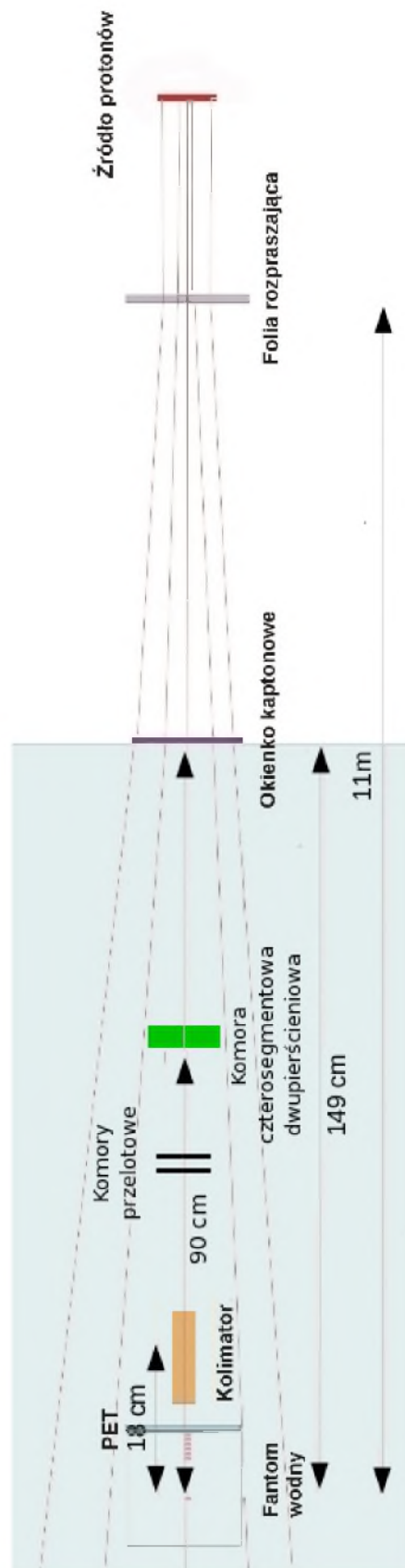
8.2 Elementy stanowiska terapii protonowej w symulowanym programie

Geometria programu symulacyjnego wzorowana jest na stanowisku terapii protonowej oka znajdującym się w IFJ PAN Kraków (Rys. 8.1), zainstalowanym przy cyklotronie AIC-144 .

Ważnym składnikiem geometrii programu symulacyjnego jest fantom wodny, w którym rejestrowane są dawki dla poszczególnych głębokości. Energia protonów rejestrowana jest w fantomie wodnym, który jest sześcianiem o boku 10 cm. W wodzie znajdują się detektory logiczne, czyli objętości, które rejestrują energię zdeponowaną przez padające cząstki. Każdy z nich ma kształt cienkiego prostopadłościanu (20 mm x 20 mm x 0,08 mm). Odległości między ich środkami to 0,1 mm. Symulowana jest też przednia ścianka fantomu wodnego, zbudowana z PET, o grubości 0,5454 mm.

Wiązka terapeutyczna, po opuszczeniu źródła porusza się w próżni, pada na tantalową folię rozpraszającą, o grubości 25 nm, oddaloną o 11 m od fantomu. Następnie protony przechodzą przez okienko kaptonowe o grubości 0,03 mm, które oddziela próżnię w jonowodzie od pomieszczenia terapeutycznego, wypełnionego powietrzem. Odległość pomiędzy środkiem fantomu a okienkiem to 149 cm. Kolejnymi symulowanymi obiektami są komory jonizacyjne, monitorujące wiązkę: komora czterosegmentowa dwupierścieniowa i dwie komory przelotowe. W programie, geometria komór została wprowadzona w sposób uproszczony, w postaci walców zbudowanych z odpowiednich materiałów. Komora czterosegmentowa dwupierścieniowa składa się

z czterech elektrod z kaptonu o grubości 0,05 mm. Na każdej z nich napyłona jest cienka warstwa aluminium (0,004 mm). Środek komory znajduje się około 90 cm od środka fantomu wodnego. Komory przelotowe również zawierają cztery folie polimidowe (kaptonowe) o grubości 0,05 mm. Każda z nich pokryta jest cienką warstwą węgla (0,01 mm). Pomiedzy warstwami znajduje się powietrze. Jedna z komór znajduje się 69 cm, a druga 74 cm od środka fantomu wodnego. Kolimator końcowy ma zasadniczy wpływ na profil poprzeczny wiązki protonów, dlatego jest on opisany w rozdziale pod tytułem "Symulacje profilu wiązki".



Rys. 8.1: Schemat geometrii stanowiska terapeutycznego. Proporcje stanowiska nie są zachowane na rysunku.

Rozdział 9

Wpływ elementów geometrycznych programu na rozkład dawki na głębokości

Symulacje komputerowe z wykorzystaniem GEANT4 są dogodnym narzędziem, aby zbadać, jaki wpływ na głębokościowy rozkład dawki mają poszczególne elementy, które znajdują się w pomieszczeniu terapeutycznym. Interesujące jest, czy po przejściu wiązki protonów przez obiekt i oddziaływaniu z jego atomami, zmienia się głębokość występowania dawki maksymalnej oraz dawka względna na wejściu. W najprostszej wersji programu znajdowało się źródło protonów oraz fantom wodny z detektorami logicznymi, a protony poruszały się w próżni. Kolejne, bardziej złożone pliki z opisem geometrii uwzględniały:

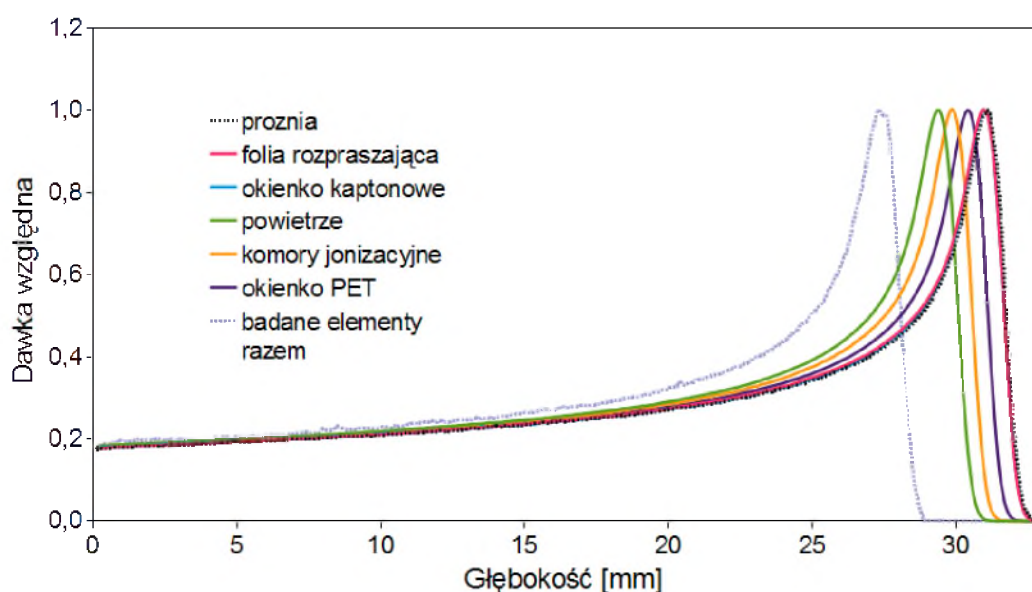
- rozpraszającą folię tantalową,
- okienko kaptonowe, oddzielające jonowód, w którego wnętrzu znajduje się próżnia, od pomieszczenia terapeutycznego,
- powietrze,
- dwie komory przelotowe oraz komorę czterosegmentową dwupierscieniową,
- okienko PET, przez które protony wpadają do fantomu wodnego.

Każdy z wymienionych składników badany był oddzielnie. Kolejnym krokiem było utworzenie programu, którego geometria zawierała wszystkie badane elementy.

Taka symulacja z dużą dokładnością odzwierciedla to, co dzieje się podczas radioterapii w rzeczywistości.

Symulacje zostały przeprowadzone dla wiązki o rozkładzie energetycznym bazującym na rozkładzie normalnym, o średniej energii 60,5 MeV i odchyleniu standardowym 0,5 MeV. W programie wprowadzono instrukcję warunkową, która powoduje, że symulowane są cząstki jedynie o energii mniejszej niż 60,7 MeV. Taka instrukcja warunkowa umożliwia poprawienie głębokościowego rozkładu dawki poprzez uzyskanie szybszego spadku dawki do zera za pikiem Bragga. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie lepszej zgodności symulacji z danymi pomiarowymi.

Wykresy zależności dawki względnej od głębokości przedstawione są na rysunku 9.1 .



Rys. 9.1: Rozkład dawki na głębokości dla różnych wariantów geometrii programu symulacyjnego.

Zestawienie parametrów, takich jak stosunek dawki na wejściu do dawki maksymalnej oraz głębokość, na której zarejestrowana została największa dawka, znajdują się w tabeli 9.1.

Dołożenie każdego kolejnego elementu geometrii powoduje przesunięcie się piku Bragga w stronę mniejszych głębokości i wzrost dawki względnej na wejściu. Okienko kaptonowe i folia rozpraszająca nie zmieniają znacznie rozkładu dawki na głębokości, a wynik symulacji dla tych elementów niewiele różni się od otrzymanego w progra-

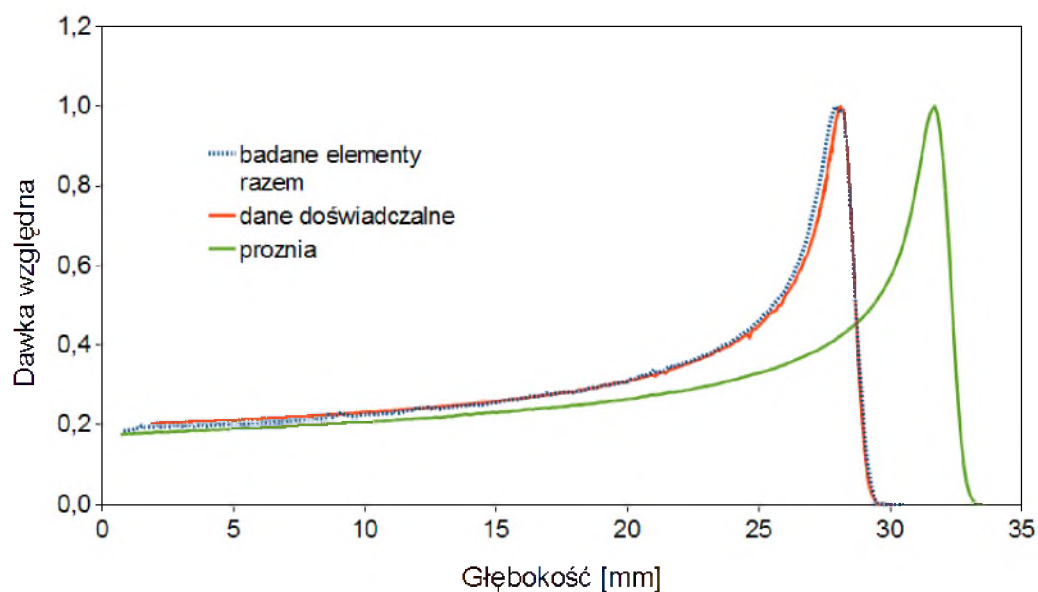
Tabela 9.1: Zestawienie dawki względnej na wejściu oraz głębokości, na której znajduje się pik Bragga dla różnych wariantów geometrii programu symulacyjnego.

Element geometrii	Dawka względna na wejściu	Głębokość występowania dawki maksymalnej [mm]
próżnia	0,17	31,1
powietrze	0,18	29,4
folia rozpraszająca	0,18	30,9
okienko kaptonowe	0,18	31,0
przednia ściana fantomu	0,18	30,4
komory jonizacyjne	0,18	29,8
wszystkie elementy	0,19	27,3

mie zawierającym jedynie źródło protonów i fantom wodny. Natomiast okienko PET i komory jonizacyjne, a także powietrze wypełniające pomieszczenie terapeutyczne powinny być uwzględnione w programie symulacyjnym, gdyż ich wpływ jest znaczący.

Rezultat symulacji z geometrią uwzględniającą wszystkie najważniejsze składniki stanowiska terapii protonowej porównano z eksperymentem (Rys.9.2). Dane pomiarowe są opracowywane w ten sposób, aby obliczyć, jaki byłby rozkład dawki w oku. Różnica pomiędzy napromienianiem gałki ocznej a pomiarem dozymetrycznym wynika z faktu, że podczas radioterapii protony, po przejściu przez systemy monitorowania i kształtowania wiązki wpadają bezpośrednio do oka, natomiast podczas pomiarów muszą jeszcze dodatkowo pokonać przednią ścianę fantomu wodnego. Absorbuje ona część energii wiązki i sprawia, że maksymalna dawka zdeponowana jest na mniejszej głębokości. Efekt ten wymaga uwzględnienia podczas porównywania danych pomiarowych i symulacyjnych. Znając skład materiału, z jakiego zbudowana jest ścianka fantomu (PET), oblicza się dla niego średnią liczbę atomową. Po porównaniu tej wartości z średnią liczbą atomową wody oraz po uwzględnieniu grubości okienka obliczony zostaje ekwiwalent wodny przedniej ściany fantomu. Wynosi on 0,6 mm. Taką wartość trzeba dodać do głębokości, na których zarejestrowano poszczególne dawki, aby uzyskać rozkład dawki na głębokości, jaki zostałby zarejestrowany w oku pacjenta.

Średnie odchylenie procentowe symulacji od danych pomiarowych w opisywanym przypadku to 3,6 %.



Rys. 9.2: Zestawienie rozkładów dawki uzyskanej za pomocą programów z najprostszą i najbardziej złożoną geometrią z danymi pomiarowymi.

Rozdział 10

Symulacje różnych rozkładów energetycznych wiązki protonowej

Pakiet GEANT4 daje użytkownikowi dużo możliwości, jeśli chodzi o wybór rozkładu energetycznego wiązki protonowej. Można zarówno przyporządkować każdej cząstce w wiązce tę samą energię, jak i opisać rozkład energetyczny złożoną funkcją. Energia protonów jest zmienną, która ma decydujący wpływ na ich zasięg. Symulacje komputerowe są dogodnym narzędziem do zbadania, jak zmienia się rozkład dawki na głębokości w zależności od widma energetycznego wiązki protonów. Obliczenia były przeprowadzane dla pliku z geometrią zawierającego najważniejsze, opisane w poprzednim rozdziale elementy geometryczne. Uwzględnione zostały zarówno oddziaływania z powłokami elektronowymi, jak i reakcje jądrowe.

10.1 Wiązka monoenergetyczna

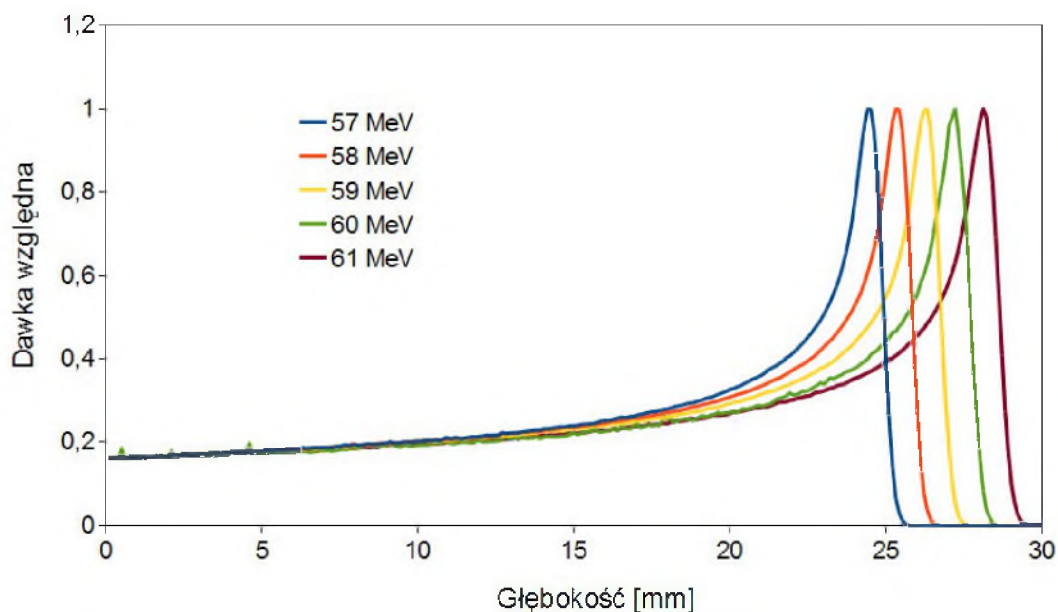
Najprostrzym przykładem definicji rozkładu energetycznego wiązki jest przypadek, w którym wszystkie protony mają dokładnie taką samą energię. Na rysunku 10.1 przedstawiono kilka przykładowych rozkładów dawki na głębokości dla wiązek o energiach: 57 MeV, 58 MeV, 59 MeV, 60 MeV i 61 MeV. Tabela 10.1 zawiera zestawienie głębokości występowania dawki maksymalnej oraz stosunek dawki wejściowej do maksymalnej dla różnych energii wiązki.

Dla coraz większych energii pik Bragga znajduje się na większych głębokościach, natomiast nie zmienia się stosunek dawki na wejściu do dawki maksymalnej (Rys.

Tabela 10.1: Porównanie głębokości występowania pików Bragga oraz dawki względnej na wejściu dla różnych energii wiązki protonów.

Energia [MeV]	Głębokość dawki maksymalnej [mm]	Dawka względna na wejściu
57	24,4	0,16
58	25,3	0,16
59	26,3	0,16
60	27,2	0,16
61	28,1	0,16

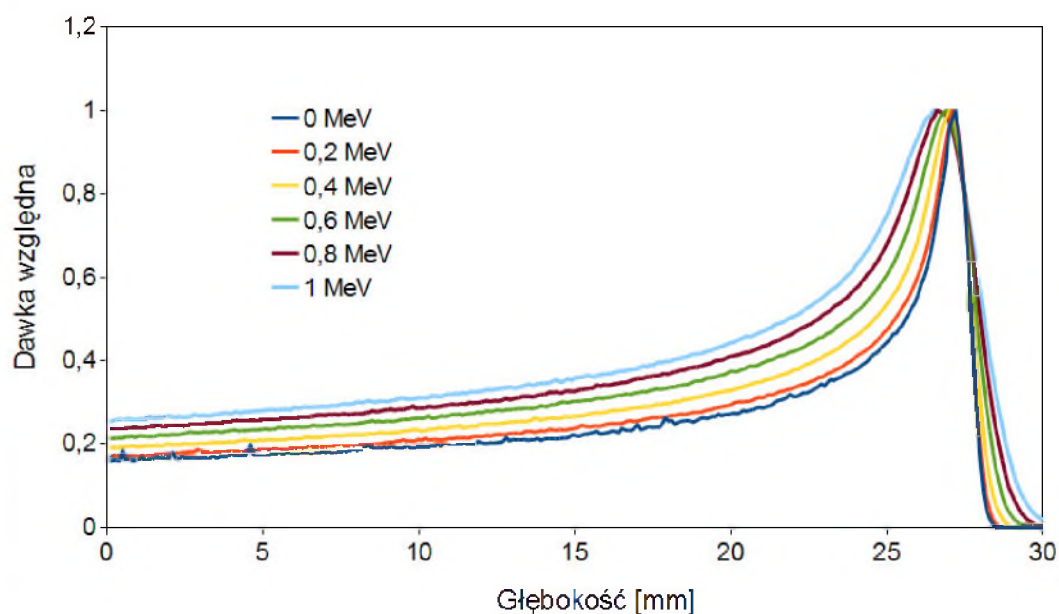
10.1). Przy symulacjach wiązek monoenergetycznych nie osiągnięto zadowalającej zgodności otrzymanych wyników z danymi pomiarowymi, nawet w przypadku programu o złożonej geometrii, dlatego istnieje konieczność określenia rozkładu energetycznego w inny sposób. Rzeczywista wiązka protonów, stosowana w napromienianiu oka w IFJ PAN w Krakowie nie jest wiązką monoenergetyczną, dlatego przy założeniu tak prostego rozkładu nie jest możliwe uzyskanie poprawnych wyników programu symulacyjnego.



Rys. 10.1: Rozkład dawki na głębokości dla monoenergetycznych wiązek protonów o energiach 57 MeV, 58 MeV, 59 MeV, 60 MeV i 61 MeV.

10.2 Wiązka z energetycznym rozkładem normalnym

Rozkład normalny jest stosowany do opisu różnych wielkości w fizyce. W programie symulacyjnym można łatwo zastosować go do opisu energii wiązki protonów. Trzeba tylko podać energię średnią (dla której przypada maksimum rozkładu) oraz odchylenie standardowe. Poniżej zamieszczono przykłady głębokościowych rozkładów dawek, gdzie maksimum rozkładu występowało dla energii 60 MeV, natomiast odchylenia standardowe (rozmycia energetyczne) wynosiły 0,2 MeV, 0,4 MeV, 0,6 MeV, 0,8 MeV i 1,0 MeV. Uzyskane dane zostały porównane z rozkładem dla wiązki monoenergetycznej, o energii 60 MeV (Rys. 10.2).



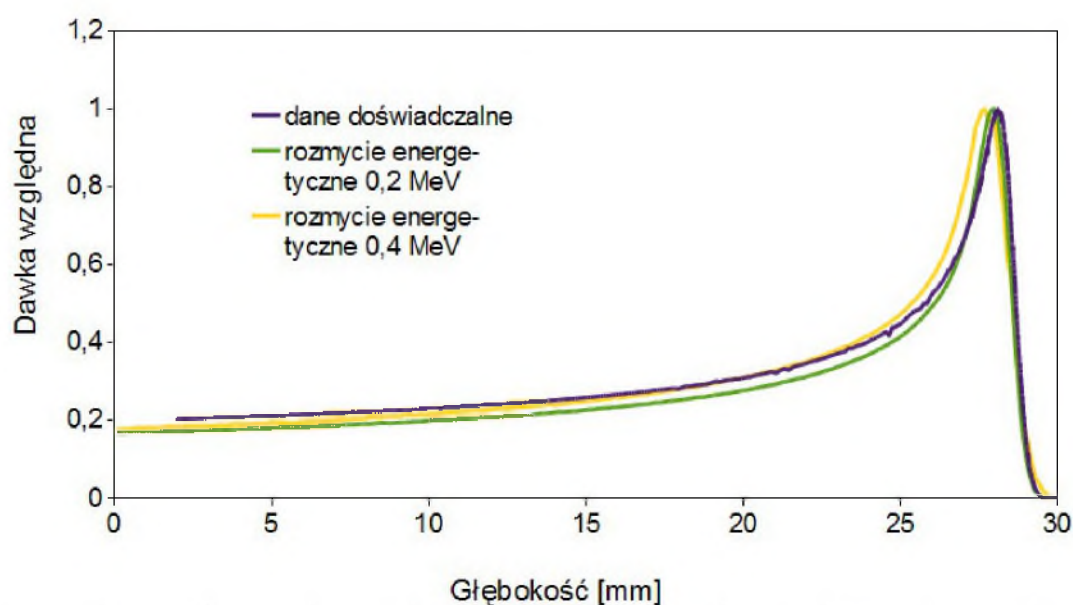
Rys. 10.2: Rozkład dawki na głębokości dla wiązki protonów, których widmo energetyczne opisane jest rozkładem normalnym, ze energią średnią 60 MeV i odchyleniem standardowym wynoszącym: 0 MeV, 0,2 MeV, 0,4 MeV, 0,6 MeV, 0,8 MeV i 1,0 MeV.

W przypadku symulacji z wykorzystaniem rozkładu normalnego nie udało się napisać programu symulacyjnego, w którym średnie odchylenie danych symulacyjnych od pomiaru byłoby mniejsze niż 5%. Na przykład symulacja dla rozkładu Gaussa o energii średniej 60,2 MeV i rozmyciu energetycznym 0,2 MeV wykazuje dobrą zgodność w obszarze pików Bragga, natomiast odstaje od danych pomiarowych w obszarze plateau. Gdy z kolei przyjęto większe rozmycie energetyczne (0,4 MeV)

rozbieżności w obszarze stopniowego narastania dawki są mniejsze, jednak rozkład w obszarze piku się zmienia i nie wykazuje zgodności z pomiarem (Rys. 10.3). Istotne parametry rozkładów dawki zestawione są w tabeli 10.2 .

Tabela 10.2: Porównanie głębokości występowania piku Bragga oraz dawki względnej na wejściu dla wiązki protonów o energii średniej 60 MeV i różnych odchyleniach standardowych.

Odchylenie standardowe [MeV]	Głębokość dawki maksymalnej [mm]	Dawka względna na wejściu
0,0	27,2	0,16
0,2	27,1	0,17
0,4	27,0	0,19
0,6	26,9	0,21
0,8	26,6	0,24
1,0	26,5	0,25



Rys. 10.3: Rozkład dawki na głębokości dla wiązki protonów o energii 60,2 MeV i rozmyciach energetycznych 0,2 i 0,4 MeV. Na wykresie widać także dane pomiarowe.

10.3 Zmodyfikowany rozkład Gaussa

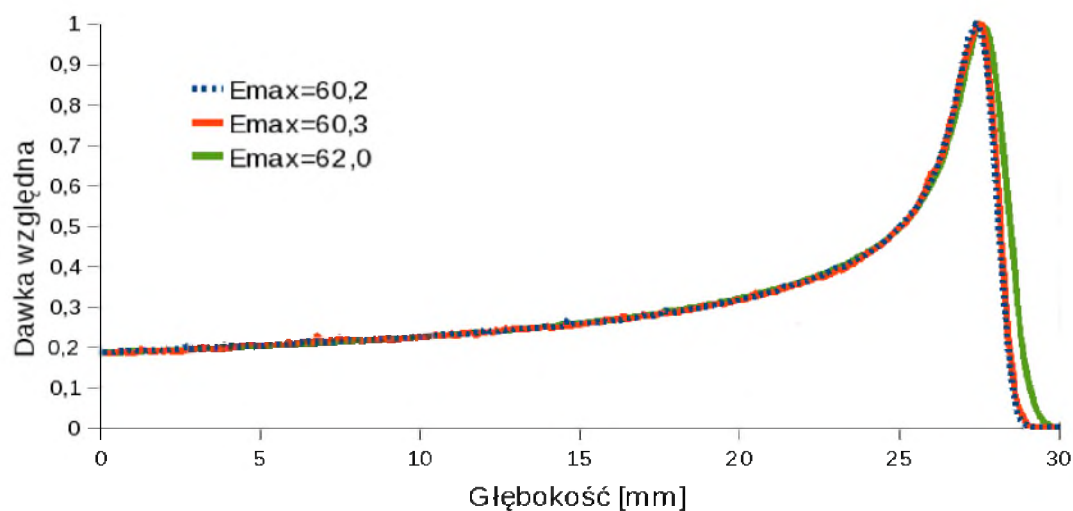
W pliku, w którym zdefiniowany jest rozkład energetyczny Gaussa, istnieje możliwość umieszczenia instrukcji warunkowej, dzięki której nie są uwzględniane protony o największych energiach. Dzięki temu w rozkładzie dawki pojawia się szybszy, niż w przypadku rozkładu Gaussa, spadek dawki za pikiem. Taka definicja rozkładu energetycznego umożliwia napisanie programu, który dawałby wyniki zgodne z pomiarem z dokładnością lepszą niż 5% średniego odchylenia. Przykłady rozkładów dawek dla zmodyfikowanego rozkładu dawki są przedstawione na rysunku 10.4. Głębokość, na której występuje dawka maksymalna, dawka względna na wejściu oraz głębokość, dla której dawka spadła do wartości 1% dawki maksymalnej znajdują się w tabeli 10.3.

Tabela 10.3: Porównanie głębokości występowania piku Bragga, dawki względnej na wejściu oraz głębokości, dla której dawka wynosi 1% dawki maksymalnej (głębokość spadku dawki) dla wiązki protonów o rozkładzie przyjmującym maksimum dla energii 60 MeV, odchyleniu standardowym 0,5 MeV i różnych energiach maksymalnych.

Energia maksymalna [MeV]	Głębokość dawki maksymalnej [mm]	Dawka względna na wejściu	Głębokość spadku dawki [mm]
60,2	27,4	0,19	28,9
60,3	27,5	0,18	29,0
62,0	27,5	0,18	29,6

W rozdziale dziewiątym opisany był przykład zastosowania takiego rozkładu, dla energii 60,5 MeV, rozmycia energetycznego 0,5 MeV, gdzie energia cząstek nie była większa niż 60,7 MeV. Zgodność symulacji z pomiarem w obszarze piku Bragga jest dobra, a średnie odchylenie symulacji od pomiaru to 3,6%. Jednak po dokładniejszym przeanalizowaniu wyników można zauważyć, że w obszarze plateau otrzymano dawkę względną niższą, niż w przypadku danych pomiarowych. Dawka względna na wejściu dla symulacji to 0,19, a dla danych pomiarowych jest to 0,20. Pomimo, że różnica ta jest akceptowalna, warto przeprowadzić symulacje dla bardziej złożonego rozkładu energetycznego i uzyskać dane symulacyjne jeszcze bardziej zbliżone do

zmierzonych.



Rys. 10.4: Rozkład dawki na głębokości dla wiązki protonów o rozkładzie energetycznym będącym modyfikacją rozkładu Gaussa o energii średniej 60 MeV i odchyleniu standardowym 0,5 MeV. Dla każdej z wiązek różne są maksymalne energie protonów, które wynoszą odpowiednio 60,2 MeV, 60,3 MeV i 62 MeV. Rozkład dawki dla mniejszych głębokości jest taki sam dla każdego z omawianych rozkładów energetycznych, natomiast w obszarze spadku dawki za pikiem Bragga można zauważyć, że im większa jest maksymalna energia wiązki, tym większa jest głębokość, dla której dawka względna spada do zera.

10.4 Rozkład energetyczny opisany histogramem

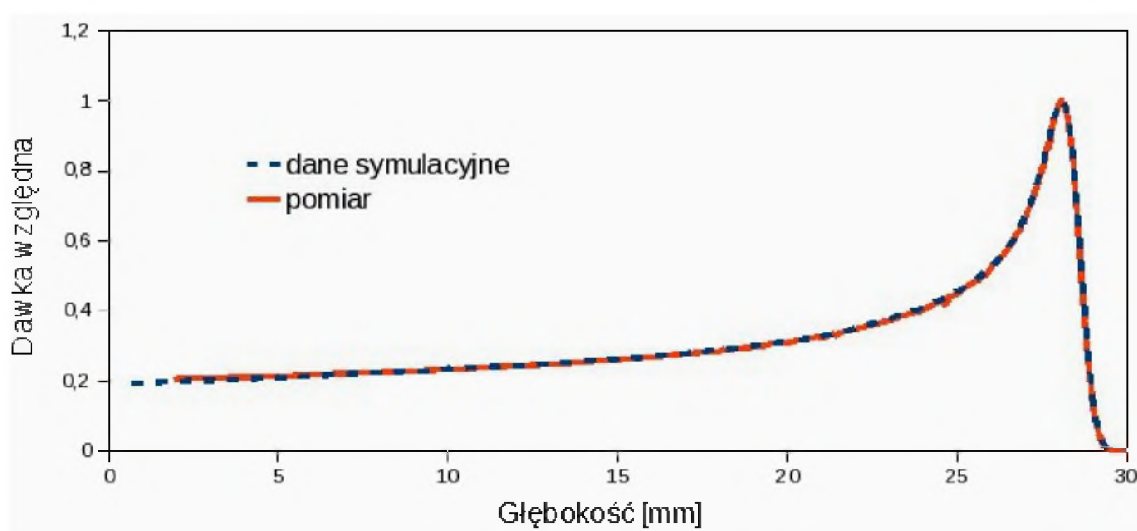
Jeszcze bardziej złożonym sposobem zdefiniowania rozkładu energetycznego jest określenie energii za pomocą histogramu, w którym prawdopodobieństwa wystąpienia energii z danego przedziału są określane przez użytkownika. Podobnie, jak w przypadku energetycznego rozkładu Gaussa pozbawionego cząstek o największych energiach, istnieje tu możliwość określenia górnej granicy energii, powyżej której cząstki nie są już symulowane. Ponadto, można w wiązce umieścić niewielką ilość cząstek o energiach znacznie mniejszych niż 60 MeV, co pozwala na podniesienie się dawki w obszarze plateau. Przedziały energetyczne oraz prawdopodobieństwa, że proton będzie miał energię należącą do danego przedziału wymienione są w tabeli 10.4. Tak złożone określenie energii wiązki protonów pozwala na napisanie programu, który dawałby wynik różniący się od danych eksperymentalnych o 1,1%. Wykresy zależności dawki względnej od głębokości dla symulacji i pomiaru znajdują się na rysunku 10.5.

Tabela 10.4: Prawdopodobieństwa występowania energii w poszczególnych przedziałach.

Przedział energetyczny [MeV]	Prawdopodobieństwo
16 - 18	0,0005
18 - 20	0,0005
20 - 22	0,0005
22 - 24	0,0005
24 - 26	0,0005
26 - 28	0,0005
28 - 30	0,0005
30 - 31	0,0010
31 - 32	0,0010
32 - 33	0,0010
33 - 34	0,0010
34 - 35	0,0010
35 - 36	0,0010
36 - 37	0,0010
37 - 38	0,0010

38 - 39	0,0010
39 - 40	0,0010
40 - 41	0,0010
41 - 42	0,0010
42 - 43	0,0010
43 - 44	0,0010
44 - 45	0,0010
45 - 46	0,0010
46 - 47	0,0010
47 - 48	0,0010
48 - 49	0,0010
49 - 50	0,0010
50 - 51	0,0010
51 - 52	0,0010
52 - 53	0,0010
53 - 54	0,0010
54 - 55	0,0011
55 - 55,5	0,0022
55,5 - 56	0,0024
56 - 56,5	0,0026
56,5 - 57	0,0030
57 - 57,5	0,0040
57,5 - 58	0,0040
58 - 58,5	0,0040
58,5 - 59	0,0040
59 - 59,1	0,0200
59,1 - 59,2	0,0200
59,2 - 59,3	0,0200
59,3 - 59,4	0,0200
59,4 - 59,5	0,0200
59,5 - 59,6	0,0200
59,6 - 59,7	0,0200

59,7 - 59,8	0,0400
59,8 - 59,9	0,0500
59,9 - 60	0,0500
60 - 60,1	0,0900
60,1 - 60,2	0,2000
60,2 - 60,3	0,3000
60,3 - 60,4	0,7000
60,4 - 60,5	1,0000
60,5 - 60,6	0,5000
60,6 - 60,7	0,0000
60,7 - 60,8	0,0000

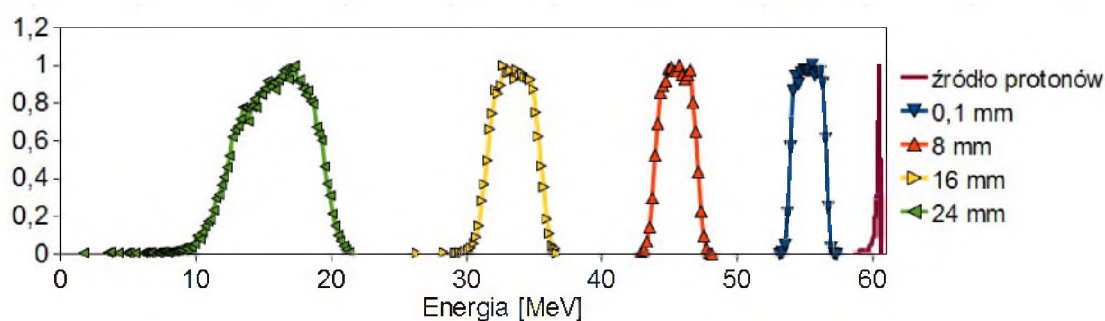


Rys. 10.5: Rozkład dawki na głębokości dla wiązki protonów o rozkładzie enegretycznym opisanym histogramem. Symulację zestawiono z danymi pomiarowymi.

10.5 Rozkłady energetyczne dla różnych głębokości w fantomie wodnym

Symulacje komputerowe, wykorzystujące pakiet GEANT4, są dogodnym narzędziem do zbadania, jak zmienia się rozkład energetyczny wiązki terapeutycznej pod wpływem oddziaływania protonów z atomami znajdującymi się na stanowisku terapii protonowej. Ponadto, można zbadać, jaką energię mają protony w różnych miejscach w oku. Geometria programu uwzględniała opisane wyżej elementy stanowiska terapii protonowej oka, a jedyna różnica polegała na zastosowaniu większych detektorów logicznych, o wymiarach 6 cm x 6 cm x 0,008 cm. Program, opracowujący wyniki symulacji, zliczał ilość protonów o różnych energiach, z dokładnością 0,2 MeV.

Na poniższym wykresie (rys. 10.6) znajdują się rozkłady energii, zarejestrowane na różnych głębokościach w fantomie wodnym: 0,1 mm, 8mm, 16 mm i 24 mm. Wyniki symulacji zostały zestawione z rozkładem źródła protonów, jaki został wprowadzony w programie symulacyjnym.



Rys. 10.6: Rozkłady energetyczne wiązki protonów. Kolorem brązowym oznaczono rozkład energetyczny źródła protonów, zdefiniowany w programie symulacyjnym. Pozostałe wykresy przedstawiają rozkłady energetyczne zarejestrowane w fantomie wodnym na różnych głębokościach. Rozkłady zostały unormowane do jedynki.

Rozkład energetyczny, zarejestrowany w pierwszym detektorze logicznym, na głębokości 0,1 mm, różni się znacznie od rozkładu źródła protonów. Zauważamy poszerzenie się rozkładu oraz zmniejszenie się energii średniej wiązki. Źródło protonów emitowało cząstki o energii około 60,4 MeV (tabela 10.4), natomiast rozkład energetyczny zarejestrowany w pierwszym detektorze logicznym ma maksimum dla energii 55,5 MeV. Protony, po opuszczeniu źródła, traciły energię podczas oddziaływania

z atomami pierwiastków tworzących stanowisko terapeutyczne. Wraz ze wzrostem głębokości w fantomie wodnym zauważono dalszy spadek energii protonów, będący skutkiem interakcji z atomami, znajdującymi się w wodzie. Ponadto zauważono znaczne poszerzenie się rozkładu energetycznego wraz z głębokością rejestracji. Liczba protonów, zarejestrowana dla większych głębokości, jest mniejsza na skutek rozproszenia wiązki. Przykładowo dla głębokości 0,1 mm energię bliską maksimum osiągnęło 2477 cząstek, a dla głębokości 24 mm- jedynie 910 cząstek. Efekt ten nie jest widoczny na wykresie, gdyż wszystkie rozkłady zostały unormowane do jedynki.

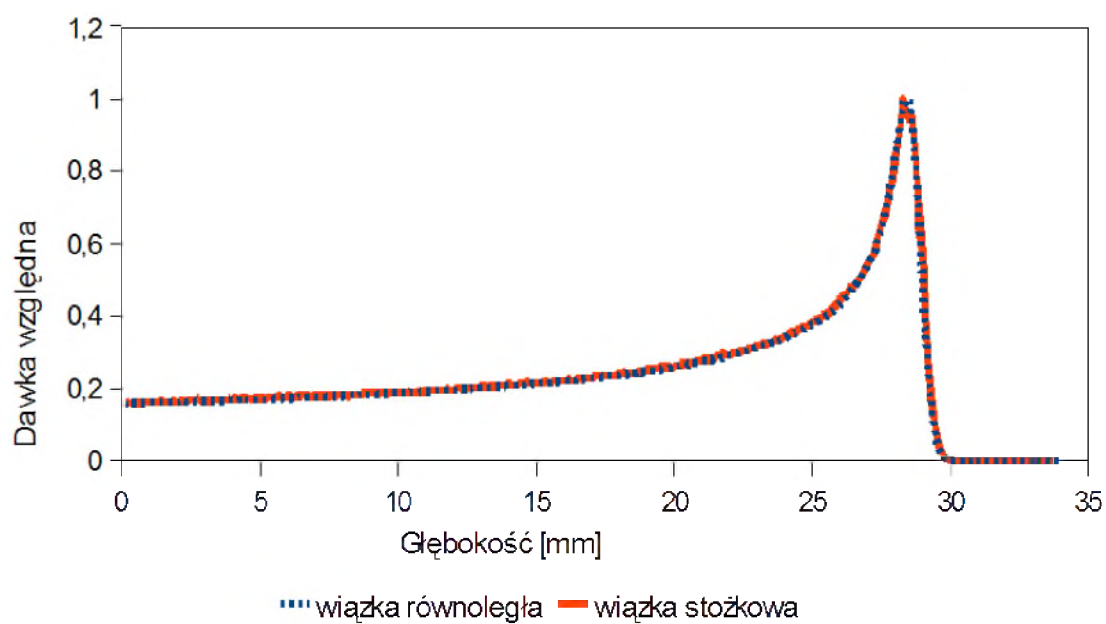
Rozdział 11

Porównanie wiązki równoległej i wiązki rozbieżnej.

Pakiet Geant4 daje użytkownikowi szerokie możliwości, jeśli chodzi o projektowanie źródła cząstek. Można zdefiniować punkt lub obszar, z którego wydostają się protony, a także określić kierunek i zwrot wektora prędkości. W najprostszym przypadku każdy proton porusza się w tym samym kierunku, co sprawia, że ze źródła wydostaje się wiązka równoległa. W zależności od potrzeb można także kierunek ruchu opisać za pomocą różnych funkcji. W opisanym przypadku symulowano wiązkę w kształcie stożka, w której dla każdego protonu kierunek ruchu opisany był wektorem $[x, y, 12 \text{ m}]$, gdzie x i y to liczby o rozkładzie Gaussa o wartości średniej 0 i odchyleniu standardowym 4m. Dla tak opisanego kierunku najwięcej protonów wydostawało się ze źródła wzdłuż osi Z (kierunek $[0\text{m}, 0\text{m}, 12\text{m}]$), ale nie brakowało też protonów odchylonych od głównego kierunku. Powstaje pytanie, czy dla wiązki równoległej i stożkowej rozkład dawki na głębokości będzie taki sam. Energia opisana była rozkładem Gaussa o maksimum dla 60 MeV i odchyleniu standardowym 0,2 MeV.

Rozkład dawki względnej na głębokości nie różni się istotnie dla wiązki stożkowej i równoległej (rysunek 11.1). Średnio różnica między wiązką stożkową a równoległą to 2,6%. Różnią się natomiast bezwzględne wartości energii, zdeponowanej w pojedynczym detektorze logicznym. W rozważanym przypadku energia ta jest średnio o 25% mniejsza dla wiązki stożkowej niż dla wiązki równoległej. Można to łatwo wytłumaczyć faktem, że wiele protonów wiązki rozbieżnej nie dociera do fantomu

wodnego i nie deponuje energii w wodzie.



Rys. 11.1: Głębokościowy rozkład dawki dla wiązki protonów w wodzie w przypadku, gdy źródło protonów emituje wiązkę równoległą, a także, gdy wiązka przyjmuje kształt stożka.

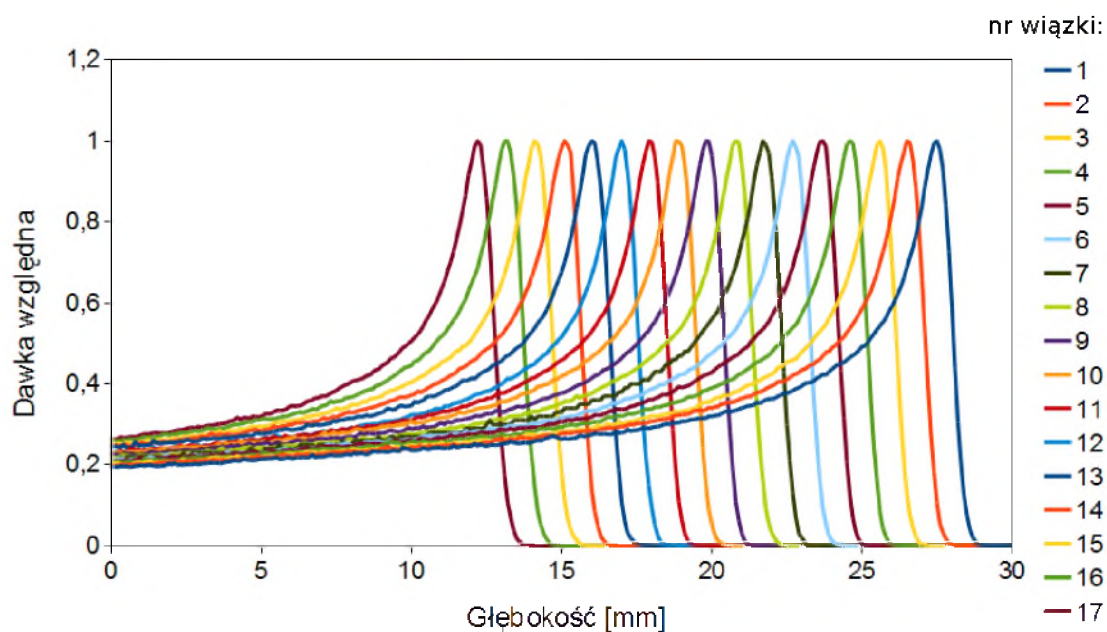
Rozdział 12

Przejście wiązki protonów przez warstwę absorbenta

Wiązka terapeutyczna oddziałuje z atomami absorbenta i oddaje im część swojej energii. Dzięki temu średnia energia protonów obniża się, co wpływa na rozkład dawki na głębokości. Efekt ten wykorzystywany jest przy projektowaniu elementów biernego systemu kształtowania wiązki, takich jak dyskryminator zasięgu i koło modulacyjne. Symulacje komputerowe z wykorzystaniem pakietu GEANT4 są dogodnym narzędziem do zbadania, w jaki sposób warstwa absorbująca wpływa na rozkład dawki na głębokości. Obliczenia wykonane były dla programu zawierającego wszystkie istotne przyrządy znajdujące się na stanowisku terapii protonowej oka. Oprócz opisanych wcześniej elementów, geometria programu uwzględnia warstwę PMMA, znajdującą się w odległości 95 cm od środka fantomu wodnego. Rozkład energetyczny opisany jest histogramem (tabela 10.4). Przebadane grubości PMMA nie są przypadkowe. Są to wysokości wycinków walca, z których zbudowany jest rzeczywisty modulator energii, stosowany na stanowisku terapii protonowej IFJ PAN w Krakowie. Wysokości wycinków walca wymienione są w tabeli 12.1.

Zgodnie z oczekiwaniami, wraz ze wzrostem grubości warstwy, obniża się głębokość pików Bragga (wykresy 12.1 i 12.2). Dla każdego milimetra PMMA głębokość występowania pików Bragga przesuwa się w stronę mniejszych głębokości o 1,18 mm. Im większa jest grubość PMMA, tym wyższa jest dawka względna na wejściu (tabela 12.1). Przejście wiązki przez warstwę ma jeszcze jeden skutek: im grubszy absorbent, tym mniejsza ilość protonów dociera do detektorów wodnych. Spowodowane

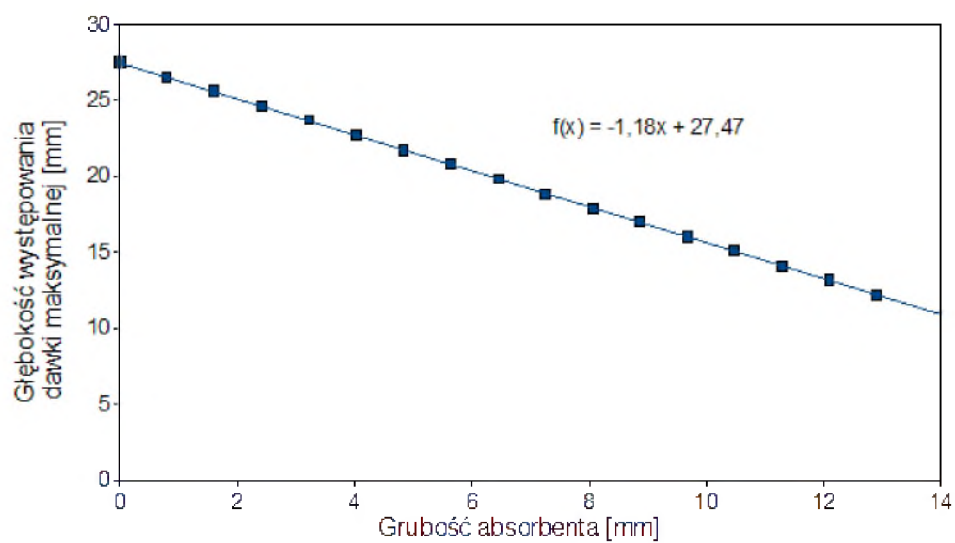
jest to rozpraszaniem wiązki. W konsekwencji dla wiązki, która pokonała warstwę PMMA o grubości 12,9 mm, dawka zdeponowana w obszarze piku Bragga stanowi w przybliżeniu 84% dawki maksymalnej dla wiązki, która nie przechodziła przez absorbującą płytkę.



Rys. 12.1: Rozkłady dawki na głębokości dla wiązek, które przeszły przez warstwy PMMA o różnych grubościach zestawione z rozkładem dla wiązki, która nie przeszła przez płytkę absorbującą (wiązka nr 1).

Tabela 12.1: W tabeli zestawiono informacje na temat rozkładów głębokościowych dla wiązek protonów po przejściu przez warstwy PMMA o różnych grubościach.

Numer wiązki	Grubość absorbenta [mm]	Głębokość dawki maksymalnej [mm]	Dawka względna na wejściu
1	0	27,5	0,20
2	0,8	26,5	0,20
3	1,61	25,6	0,20
4	2,42	24,6	0,21
5	3,23	23,7	0,21
6	4,03	22,7	0,21
7	4,84	21,7	0,21
8	5,64	20,8	0,22
9	6,45	19,8	0,22
10	7,25	18,8	0,23
11	8,06	17,9	0,23
12	8,87	17	0,23
13	9,68	16	0,25
14	10,48	15,1	0,25
15	11,29	14,1	0,25
16	12,1	13,2	0,26
17	12,9	12,2	0,26



Rys. 12.2: Wykres zależności głębokości dawki maksymalnej od grubości absorbenta. Im grubsza jest warstwa PMMA, tym mniejsza jest głębokość, na której występuje pik Bragga.

Rozdział 13

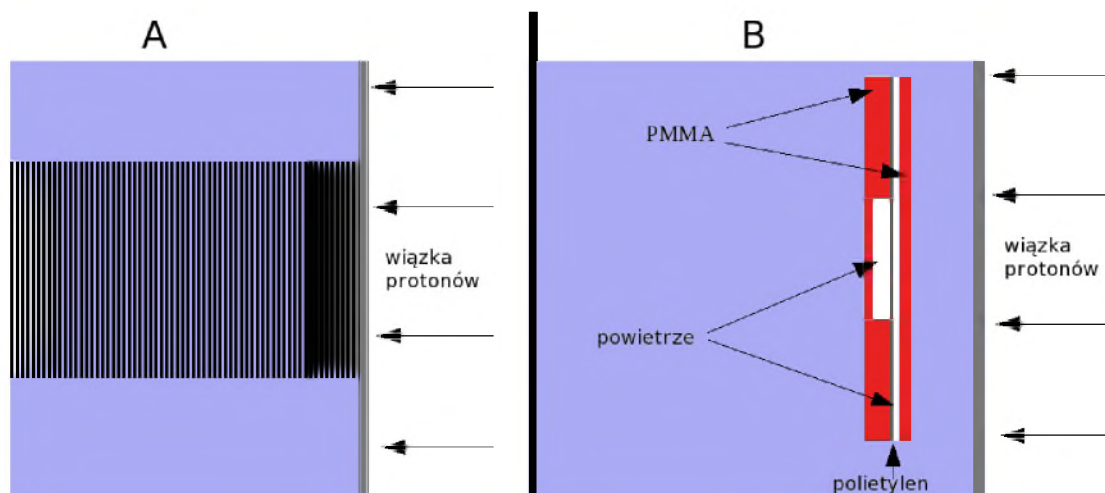
Symulacje komory Markus

Pomiary rozkładu dawki na głębokości na stanowisku terapii protonowej w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie były wykonane za pomocą komory jonizacyjnej Markus typu 23343. W programie symulacyjnym układ detekcyjny jest znacznie uproszczony: energia zdeponowana przez protony rejestrowana jest w detektorach logicznych mających kształt prostopadłościanów, o wymiarach 20 mm x 20 mm x 0,08 mm, wypełnionych wodą. Detektory te zanurzone są w fantomie wodnym. Nasuwa się pytanie, czy znaczne uproszczenie układu detekcyjnego ma wpływ na rejestrowany rozkład dawki na głębokości. Aby poznać odpowiedź, niezbędne jest przeprowadzenie symulacji, w których odwzorowane byłyby elementy konstrukcji komory Markus.

W bardziej złożonym programie symulacyjnym nakładka komory Markus złożona jest z trzech walców o promieniu 1,5 cm. Pierwszy z nich, zbudowany z PMMA, ma wysokość 0,87 mm. Drugi, wypełniony powietrzem, ma wysokość 0,4 mm, a trzeci to cienka folia z polietylenu, o grubości zaledwie 0,03 mm. Energia wiązki protonowej rejestrowana jest w części komory w kształcie walca, która wypełniona jest powietrzem. Promień objętości czynnej to 5,3 mm, a wysokość 2 mm. Objętość czynna znajduje się wewnątrz większego walca, który zbudowany jest z PMMA [39].

W programie zawierającym detektory wypełnione wodą znajduje się 500 takich obiektów, oddalonych od siebie o 0,1 mm. Każdy z nich rejestruje zdeponowaną energię w tym samym czasie, co pozwala na uzyskanie głębokościowego rozkładu dawki dzięki pojedynczej symulacji. W przypadku symulacji komory Markus, konieczne jest wykonanie osobnego programu dla każdej głębokości (Rys. 13.1).

Aby na podstawie symulacji odtworzyć rozkład dawki na głębokości w oku pa-



Rys. 13.1: Schematy geometrii programów symulacyjnych: detektorów logicznych wypełnionych wodą (A) i komory Markus (B).

cjenta, trzeba uwzględnić, że przednia ściana fantomu wodnego, w którym rejestrowano zdeponowaną energię, ma taką samą gęstość elektronową jak warstwa wody o grubości 0,6 mm. Trzeba także wziąć pod uwagę, że punkt referencyjny badanej komory znajduje się na środku powierzchni wewnętrznej okienka. W odróżnieniu od prostej symulacji detektorami wodnymi, głębokość, na jakiej zarejestrowano określoną dawkę, nie pokrywa się z położeniem środka objętości czynnej.

Programy wykonano w dwóch wersjach oddziaływań fizycznych. W pierwszej wersji symulowano wszystkie istotne procesy fizyczne, a w drugiej wyłączono reakcje jądrowe, pozwalając wiązce protonów jedynie na oddziaływanie z powłokami elektronowymi. Głębokości, dla których rejestrowano zdeponowaną energię, oraz dawki względne dla dwóch wersji oddziaływań znajdują się w tabeli 13.1. Otrzymane rozkłady dawek przedstawiono na rysunku 13.2.

Tabela 13.1: Rozkład dawki uzyskany w wyniku symulacji komory Markus w dwóch wariantach oddziaływań: z uwzględnieniem reakcji jądrowych, a także bez nich.

Głębokość [mm]	Dawka względna	
	z reakcjami jądrowymi	bez reakcji jądrowych
2,6	0,17	0,17
3,6	0,18	0,17
4,6	0,18	0,17

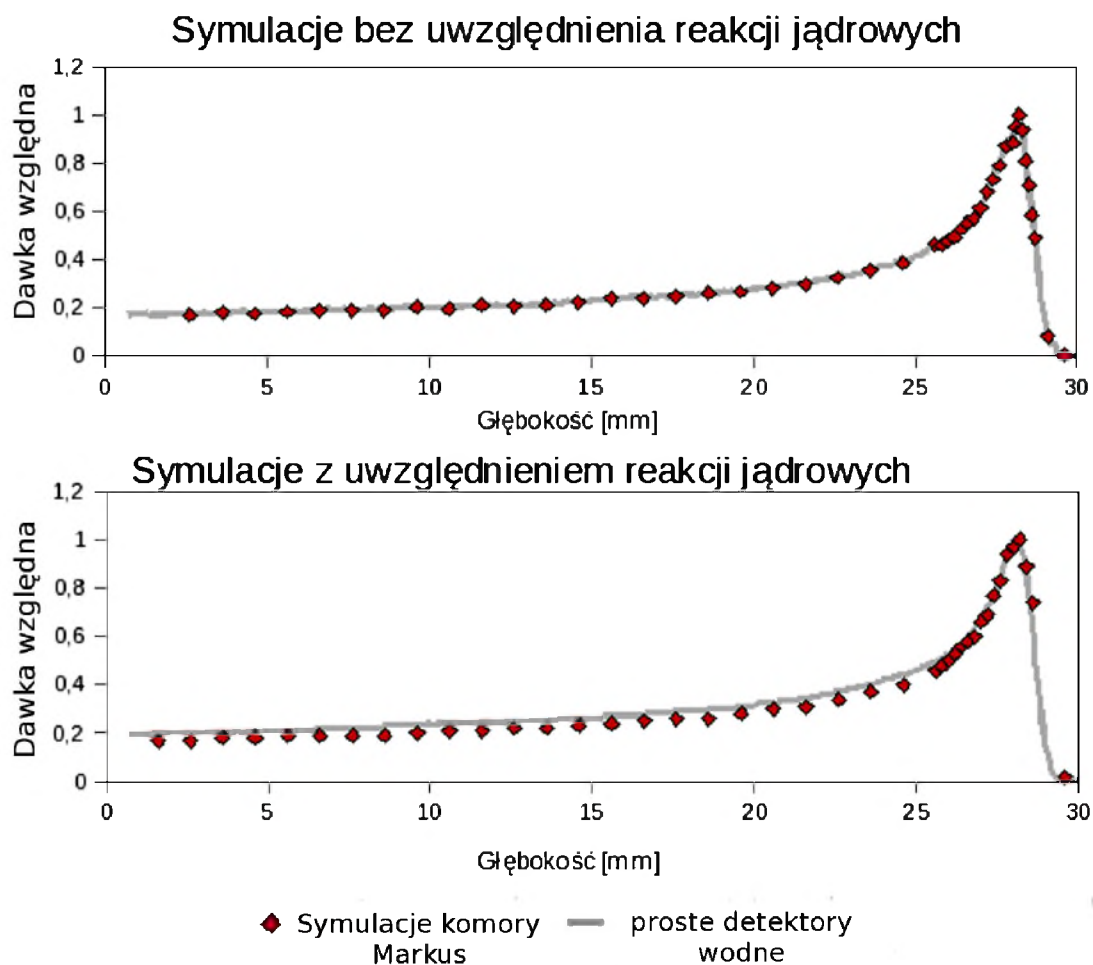
5,6	0,19	0,18
6,6	0,19	0,18
7,6	0,19	0,18
8,6	0,19	0,19
9,6	0,20	0,21
10,6	0,21	0,20
11,6	0,21	0,22
12,6	0,22	0,21
13,6	0,22	0,21
14,6	0,23	0,22
15,6	0,24	0,23
16,6	0,25	0,23
17,6	0,26	0,23
18,6	0,26	0,26
19,6	0,28	0,27
20,6	0,30	0,28
21,6	0,31	0,30
22,6	0,34	0,33
23,6	0,37	0,36
24,6	0,40	0,38
25,6	0,46	0,44
25,8	0,48	0,47
26,0	0,50	0,47
26,2	0,53	0,50
26,4	0,56	0,49
26,6	0,58	0,56
26,8	0,60	0,56
27,0	0,66	0,64
27,2	0,69	0,69
27,4	0,77	0,70
27,6	0,83	0,80
27,8	0,94	0,87

28,0	0,97	0,92
28,1	0,97	0,95
28,2	1,00	1,00
28,3	0,93	0,98
28,4	0,89	1,00
28,5	0,83	0,88
28,6	0,74	0,74
29,6	0,02	0,01
30,6	0,00	0,00

W tabeli 13.2 umieszczono dawkę względną na głębokości 2 mm dla danych symulacyjnych uzyskanych różnymi metodami oraz dla danych pomiarowych. Porównano w niej także głębokości występowania piku Bragga. Po przeanalizowaniu wyników symulacji można dojść do wniosku, że różnice między danymi uzyskanymi za pomocą prostej symulacji i symulacji odwzorowującej budowę komory Markus nie są istotne. Jednak po dokładniejszej analizie danych okazuje się, że gdy symulowane są wszystkie istotne procesy fizyczne, dla symulacji komory Markus uzyskano na wejściu mniejszą dawkę, niż dla detektorów logicznych. Różnica nie jest duża, dla głębokości 2 mm stanowi ona 3% dawki maksymalnej. Przyczyną jest większe prawdopodobieństwo występowania reakcji jądrowych dla wody niż dla PMMA oraz powietrza, z których zbudowana jest komora Markus. Woda zawiera więcej tlenu, dla którego wysokie są przekroje czynne na reakcje (p, p) , $(p, p + \alpha)$, (p, α) oraz (p, n) . Gdy oddziaływania jądrowe nie będą symulowane, rozkład dawki otrzymany za pomocą prostych detektorów wodnych i komory Markus będzie taki sam. Wykonanie symulacji z komorą Markus jest bardziej czasochłonne i wymaga większej mocy obliczeniowej. Objętość czynna wypełniona jest powietrzem, które ma mniejszą gęstość niż woda. Skutkuje to mniejszą ilością centrów oddziaływań i koniecznością przeprowadzenia symulacji dla większej liczby cząstek w celu zminimalizowania błędu statystycznego. W symulacji z wykorzystaniem detektorów wodnych, rozkład dawki

Tabela 13.2: Zestawienie dawki względnej na wejściu oraz głębokości występowania dawki maksymalnej dla symulacji komory Markus i symulacji z uproszczonymi detektorami wodnymi.

Wersja programu	Dawka względna na wejściu (głębokość 2 mm)	Głębokość występowania dawki maksymalnej [mm]
detektory wodne (bez uwzględnienia reakcji jądrowych)	0,17	28,2
komora Markus (bez uwzględnienia reakcji jądrowych)	0,17	28,2
detektory wodne (z uwzględnieniem reakcji jądrowych)	0,20	28,1
komora Markus (z uwzględnieniem reakcji jądrowych)	0,17	28,2
dane pomiarowe	0,20	28,1



Rys. 13.2: Porównanie rozkładów dawki uzyskanych dzięki symulacji komory Markus oraz dzięki symulacji prostych detektorów logicznych wypełnionych wodą. Symulacje były wykonywane w dwóch wersjach oddziaływań: z uwzględnieniem reakcji jądrowych a także bez nich.

na głębokości można uzyskać podczas jednej symulacji, w której liczba protonów wiązki nie przekroczy 2 milionów. W przypadku bardziej złożonej symulacji, dla każdej głębokości wykonano osobną symulację, przy czym liczba cząstek wynosiła 4 miliony.

Rozdział 14

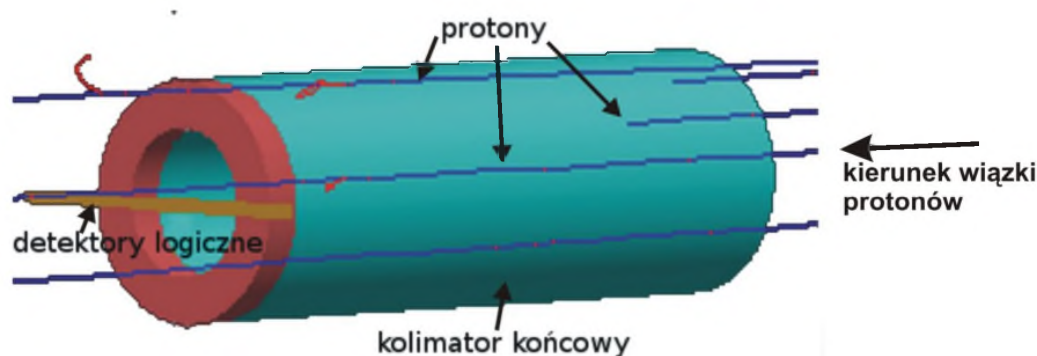
Symulacje profilu wiązki

14.1 Geometria programu

Geometria programu symulacyjnego, obliczającego profil poprzeczny wiązki protonów, różni się od geometrii programu, symulującego rozkład głębokościowy dawki. Badane elementy geometrii, takie jak okienko kaptonowe, powietrze, komory jonizacyjne, folia rozpraszająca czy kolimator pozostają bez zmian, jednak inaczej opisane są detektory logiczne, rejestrujące rozkład dawki. Aby symulacja komputerowa pozwoliła na uzyskanie rezultatu porównywalnego z pomiarem, geometria programu symulacyjnego powinna odzwierciedlać warunki eksperymentu. Pomiar profilu poprzecznego wiązki wykonany był w powietrzu, za pomocą diody krzemowej, dlatego też detektory logiczne w programie umieszczone są w powietrzu, a materiałem, z którego są zbudowane, jest krzem. Detektory są w kształcie prostopadłościanu o wymiarach 0,1 cm, 0,5 cm i 0,1 cm. Odległości między ich środkami to 0,1 cm. W programie znajduje się 101 takich detektorów logicznych. Wizualizacja układu detekcyjnego wraz z kolimatorem znajduje się na rysunku 14.1. Kolimator nie ma znaczącego wpływu na rozkład dawki na głębokości, ma jednak kluczowe znaczenie, jeśli chodzi o profil poprzeczny wiązki. Zbudowany jest z dwóch części w kształcie wydrążonego walca, o średnicy zewnętrznej 6,5 cm i średnicy wewnętrznej 2 cm. Pierwsza z nich ma wysokość 1 cm, a druga - 18 cm. Obie części wypełnione są mosiądzem.

Źródło zostało zdefiniowane w ten sposób, że protony wydostają się z jednego punktu, znajdującego się poza pomieszczeniem terapeutycznym, oddalonym o około

12 m od detektorów logicznych.



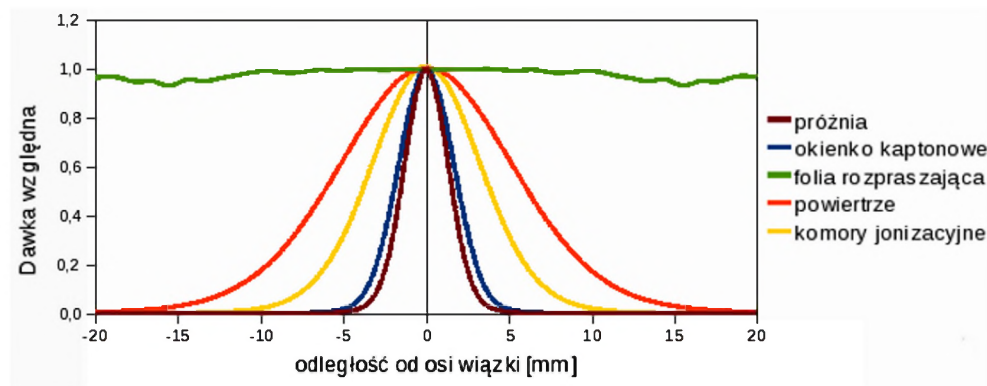
Rys. 14.1: Fragment wizualizacji programu symulującego profil wiązki, na którym widać kolimator końcowy (kolor niebieski i różowy). Kolorem pomarańczowym oznaczono detektory logiczne, rejestrujące energię protonów. Ciemnoniebieskie linie to tor protonów, a czerwone - tor elektronów, uwolnionych w wyniku oddziaływania wiązki protonów z materiałą.

14.2 Wpływ elementów geometrycznych na profil poprzeczny wiązki

Początkowym etapem pisania programu symulacyjnego było wprowadzenie detektorów logicznych oraz źródła protonów, w sytuacji gdy cały "świat" wypełniony jest próżnią. Ponieważ zdefiniowano źródło punktowe, energia została zarejestrowana głównie w detektorach logicznych, znajdujących się w osi wiązki. Kolejnym krokiem było stopniowe wprowadzanie elementów geometrycznych, takich jak folia rozpraszająca, powietrze, komory jonizacyjne i okienko kaptonowe, oraz rejestracja profilu wiązki dla każdego z elementów osobno. Dzięki temu można poznać wpływ, jaki każdy z tych obiektów wywiera na rozkład dawki wzdłuż osi X. Największe znaczenie ma tantalowa folia rozpraszająca, dzięki której rozkład staje się niemal jednorodny. Powietrze, wypełniające pomieszczenie terapeutyczne, również w istotny sposób poszerza wiązkę protonów. Mniejsze znaczenie mają komory jonizacyjne, a wpływ okienka kaptonowego jest niewielki. Uzyskane rozkłady dawki zilustrowane są na wykresie 14.2. Szerokości rozkładu dawki w połowie wysokości dla poszczególnych wariantów geometrii programu symulacyjnego znajdują się w tabeli 14.1.

Tabela 14.1: Zestawienie szerokości rozkładu dawki w połowie wysokości dla różnych wariantów geometrii programu symulacyjnego.

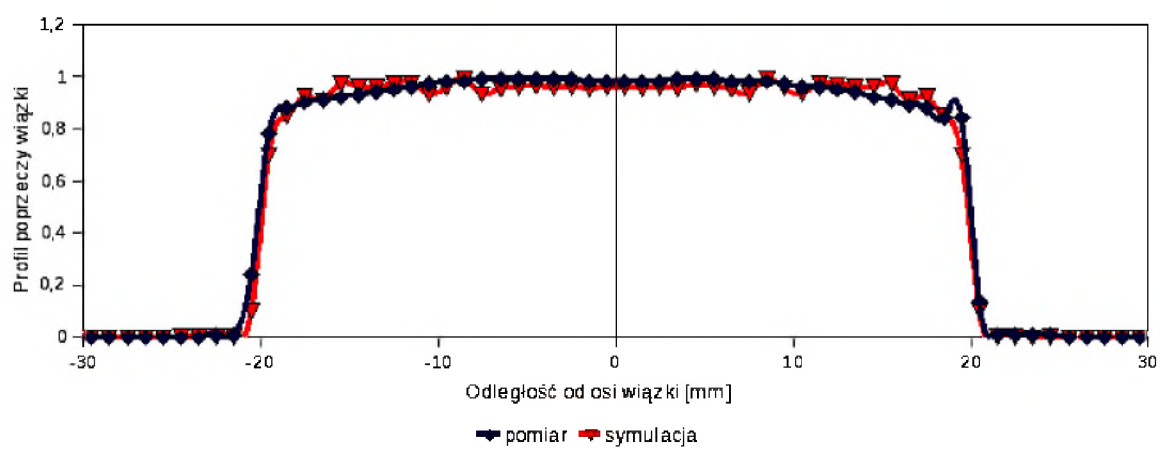
Wariant geometrii	FWHM [mm]
próżnia	3
kapton	4
komory	8
powietrze	10



Rys. 14.2: Profil wiązki dla różnych wariantów geometrii programu symulacyjnego.

14.3 Porównanie z danymi pomiarowymi

Najbardziej złożona wersja programu symulującego profil wiązki, zawierała wszystkie elementy opisane w powyższym podrozdziale, a także kolimator pacjenta. Dla każdego pacjenta taki kolimator wykonywany jest indywidualnie, z uwzględnieniem kształtu guza nowotworowego. Pomiary dozymetryczne, z którymi porównano symulacje, wykonano dla kolimatora o średnicy 4 cm. Zestawienie danych pomiarowych z symulacją znajduje się na rysunku 14.3. Średnie odchylenie symulacji od pomiaru to 5,3 %.



Rys. 14.3: Profil poprzeczny dla wiązki protonów uzyskany za pomocą symulacji komputerowych (kolor czerwony) i pomiarów (kolor granatowy).

Rozdział 15

Uproszczone symulacje modulatora zasięgu

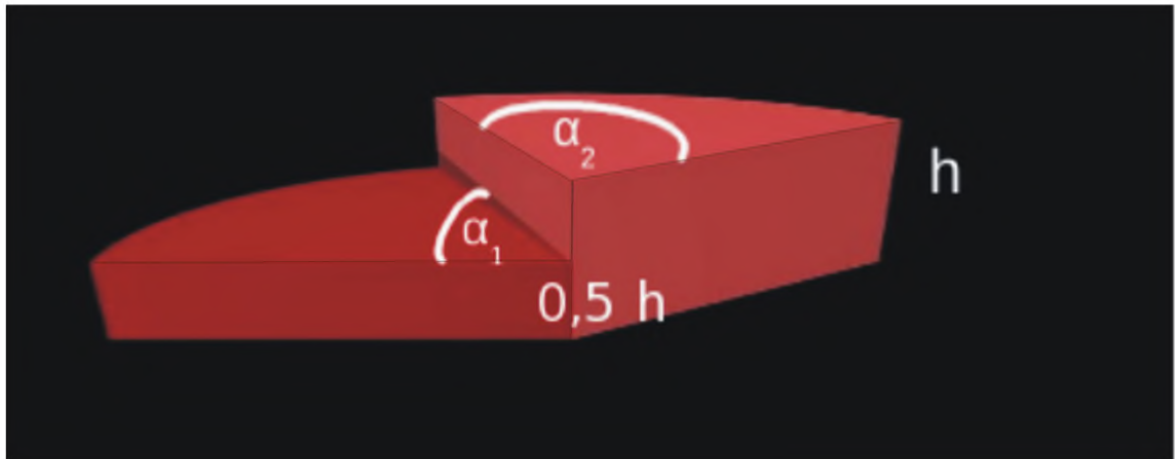
15.1 Założenia

Poniższy rozdział zawiera przykład, w jaki sposób symulacje Monte Carlo mogą być wykorzystane do zaprojektowania modulatora zasięgu. Założenie było następujące: napisać program symulujący działanie modulatora energii, który poszerza pik Bragg do 4 mm. Dla uproszczenia przyjęto, że energia protonów wiązki przyjmuje rozkład Gaussa o odchyleniu standardowym 1 MeV i następujących energiach średnich: 50 MeV, 55 MeV, 60 MeV, 65 MeV oraz 70 MeV.

Symulowany modulator zasięgu jest znacznie prostszy niż w rzeczywistości, zbudowany jest jedynie z dwóch wycinków walca (rysunek 15.1). Opisywany przykład pokazuje, że można wykorzystać symulacje komputerowe do obliczenia wymiarów modulatora, takich jak kąty rozwarcia wycinków walca, oznaczone w tym przypadku jako α_1 i α_2 oraz wysokość h .

Przyjęto, że dawka jest jednorodna, gdy różnica pomiędzy najmniejszą a największą dawką w obszarze poszerzonego piku Bragga nie przekracza 5% dawki maksymalnej. Stosunek różnicy dawki maksymalnej M i minimalnej m do dawki maksymalnej oznaczony został literą r :

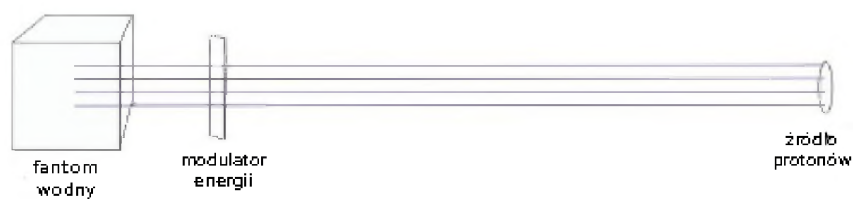
$$r = \frac{M - m}{M}. \quad (15.1)$$



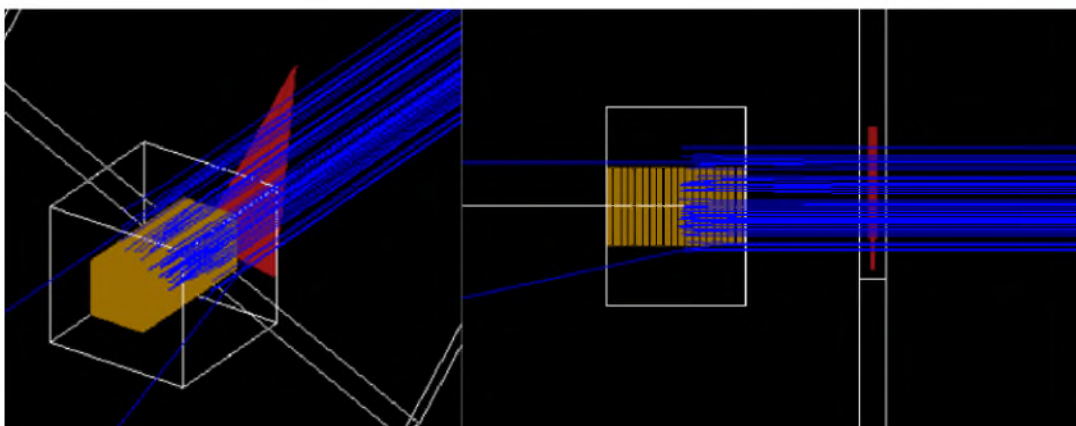
Rys. 15.1: Schemat uproszczonego modulatora energii: dwa wycinki walca o wysokościach h i $0,5h$ oraz kątach rozwarcia α_1 i α_2 .

15.2 Geometria programu

Geometria programu jest znacznie uproszczona w porównaniu z rzeczywistością. W programie uwzględniono jedynie fantom wodny, dwa wycinki walca oraz źródło protonów. Wewnątrz fantomu wodnego znajduje się 500 detektorów logicznych w kształcie prostokąta o wymiarach $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 0,008\text{ cm}$. Detektory logiczne umieszczone są wzdłuż osi wiązki. Rozkład przestrzenny protonów w wiązce jest rozkładem normalnym, z maksimum dla osi wiązki i odchyleniem standardowym 1 cm . W symulacjach źródło protonów emituje wiązkę równoległą. Schemat geometrii programu znajduje się na rysunku 15.2, a wizualizacja - na rysunku 15.3.



Rys. 15.2: Schemat geometrii programu symulacyjnego.



Rys. 15.3: Wizualizacja programu symulacyjnego. Kolorem żółtym oznaczono detektory logiczne, kolorem czerwonym- modulator energii, a kolorem niebieskim- wiązkę protonów.

15.3 Obliczanie geometrii modulatora.

Na początku należy sprawdzić, jaka grubość warstwy PMMA przesuwa maksimum rozkładu dawki o potrzebną wartość. W tym celu przeprowadzono symulacje dla warstw PMMA o różnych grubościach. W tabeli 15.3 znajdują się wyniki symulacji, w których umieszczenie warstwy absorbenta z PMMA między źródłem protonów a fantomem wodnym spowodowało przesunięcie się piku Bragga o 4 mm.

Tabela 15.1: Wyniki symulacji zmiany położenia piku Bragga w zależności od grubości warstwy absorbenta z PMMA dla różnych energii średnich wiązki protonów. W tabeli umieszczono głębokość występowania dawki maksymalnej dla badanej wiązki protonów, głębokość po przejściu protonów przez warstwę PMMA, a także grubość warstwy h , jaka została wykorzystana w dalszych obliczeniach.

Energia średnia [MeV]	Głębokość piku Bragga [mm]	Głębokość piku Bragga po przejściu przez PMMA [mm]	h [mm]
50	21,7	17,7	1,69
55	25,8	21,8	1,69
60	30,3	26,3	1,69
65	35,1	31,1	1,68
70	40,1	36,1	1,72

Następnie trzeba obliczyć, dla jakich kątów rozwarcia wycinków walca poszerzony pik Bragg będzie płaski z dokładnością do co najmniej 5%. W tym celu dla każdego detektora obliczono sumę energii zdeponowanych przez trzy wiązki: dwie przechodzące przez warstwy PMMA o różnej grubości i jedną, która nie oddziaływała z absorbentem. Do obliczeń wykorzystano arkusz kalkulacyjny. Proste sumowanie nie umożliwia jednak uzyskania jednorodnego rozkładu dawki w obszarze poszerzonego piku Bragga, dlatego konieczne jest, aby pomnożyć rozkłady dawki przez odpowiednie współczynniki, a dopiero potem dodać je do siebie (rysunki 15.4, 15.5 i 15.6).

$$D = D_1 + aD_2 + bD_3, \quad (15.2)$$

gdzie:

D_1 - energia, zdeponowana przez wiązkę protonów, która nie przeszła przez "skrzydło" modulatora,

D_2 - energia, zdeponowana przez wiązkę, która przeszła przez warstwę PMMA o grubości $0,5 h$,

D_3 - energia, zdeponowana przez wiązkę, która przeszła przez warstwę PMMA o grubości h ,

a i b - współczynniki, dobrane tak, aby uzyskany rozkład był jednorodny. Spełniają one następujące warunki: $0 < a < 1$ i $0 < b < 1$.

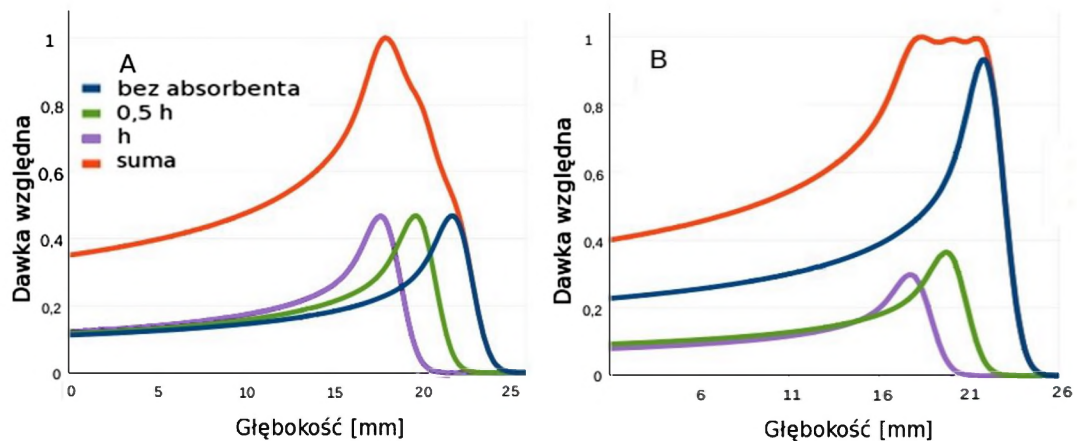
Liczby a i b posłużą do obliczenia kątów rozwarcia wycinków walca, α_1 i α_2 :

$$\alpha_1 = \frac{a \cdot 360^\circ}{1 + a + b}, \quad (15.3)$$

$$\alpha_2 = \frac{b \cdot 360^\circ}{1 + a + b}. \quad (15.4)$$

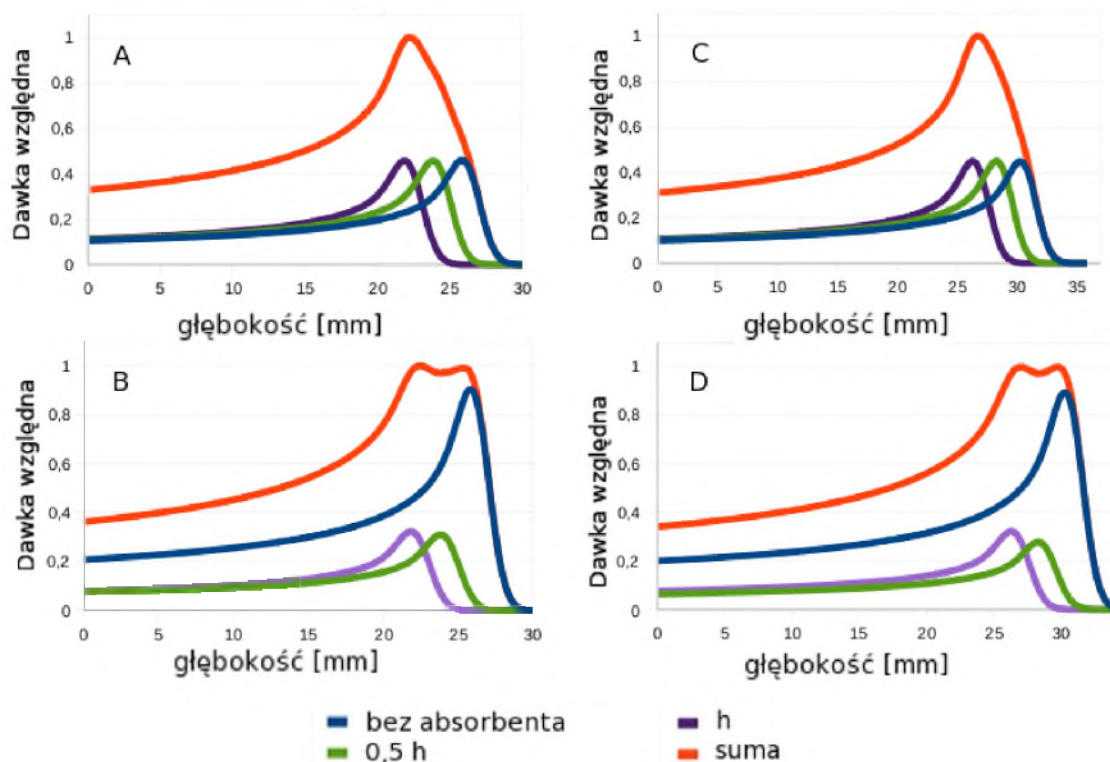
Gdy znany jest kształt, jaki powinien mieć modulator energii (tabele 15.1 i 15.3), można napisać skrypt, który wprowadzi go w ruch. Skrypt ten obracał kołem modulacyjnym wokół osi równoległej do osi wiązki, z krokiem co $0,1^\circ$ (rysunek 15.7). Modulator wykonał pełny obrót o 360° , a dla każdego położenia symulowano 5000 cząstek. Wyniki symulacji opracowane były tak, jakby była to jedna symulacja, choć w rzeczywistości program uruchamiany był 3600 razy, za każdym razem z inną geometrią. Wyniki znajdują się na wykresie 15.8 oraz w tabeli 15.3.

Po przeanalizowaniu wyników i obliczeniu współczynnika r dla każdej energii wiązki okazało się, że w opisany powyżej sposób rzeczywiście udało się zaprojektować modulator, który pozwala na uzyskanie w przybliżeniu jednorodnego rozkładu



Rys. 15.4: Rozkład dawki na głębokości dla wiązki protonowej o energii 50 MeV w trzech przypadkach: bez warstwy pochłaniającej (kolor niebieski) oraz z warstwami przesuwającymi pik Bragga o 2 mm (kolor zielony) i 4 mm (kolor fioletowy). Na wykresie zaznaczono także sumę wiązek (kolor czerwony). Na rysunku A wiązki protonów dodane są do siebie w prosty sposób, a na rysunku B- wiązki przed zsumowaniem pomnożone są przez odpowiednie wagi, a i b.

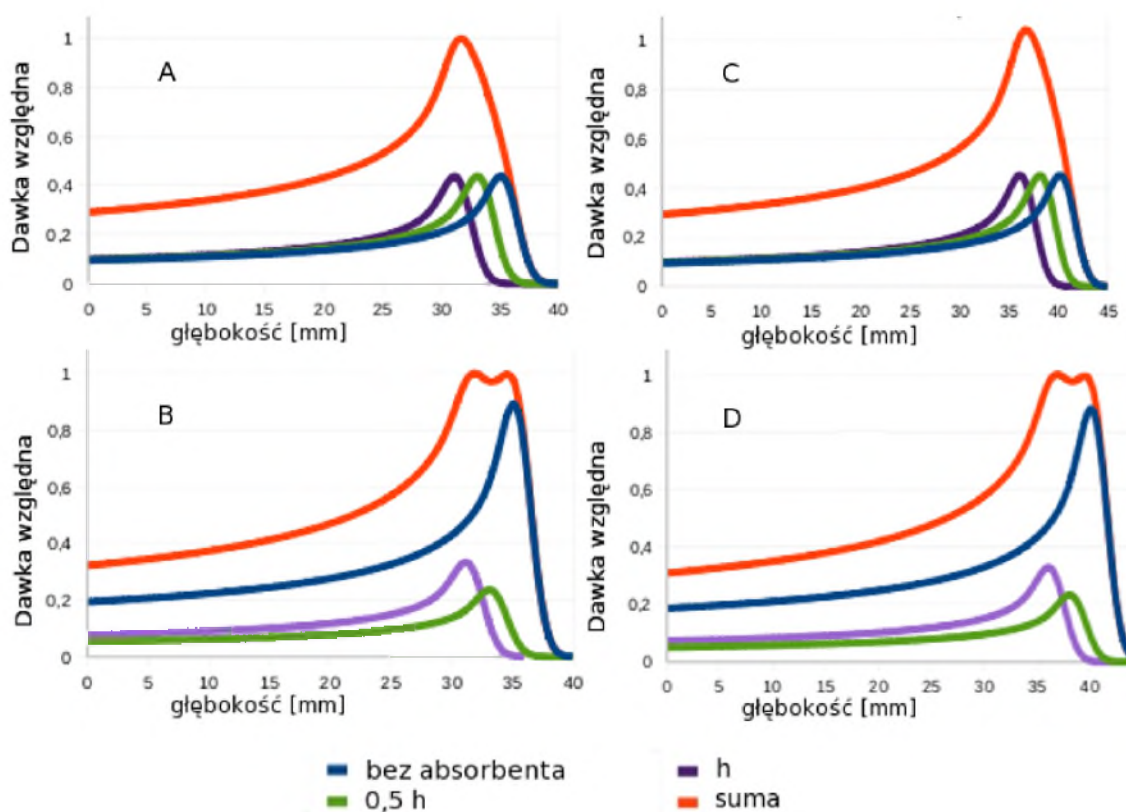
dawki w badanym przedziale ($r < 0,05$). Co prawda sytuacja opisana w programie jest dużym uproszczeniem rzeczywistości, zarówno pod względem geometrii, jak i rozkładu energetycznego, tym niemniej takie obliczenia pozwalają na stwierdzenie, że pakiet GEANT4 może być użytecznym narzędziem w projektowaniu elementów stanowiska terapii protonowej.



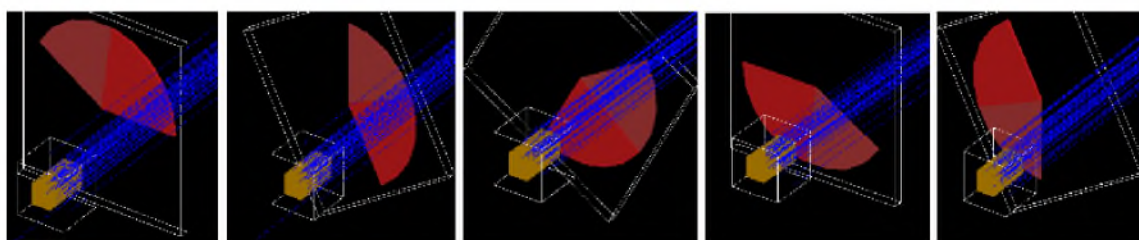
Rys. 15.5: Rysunki A i C przedstawiają rozkłady dawki, uzyskane poprzez dodanie do siebie energii zdeponowanej przez wiązki protonów o energii 55 MeV, które nie przechodziły przez absorbent, a także tych, które pokonały warstwę PMMA o grubości 0,5 h i h. Na rysunku A badana energia to 55 MeV, a na rysunku C- 60 MeV. Poniżej znajdują się sumy wiązek pomnożonych przez właściwe współczynniki a i b (rysunek B- energia 55 MeV, a rysunek D- dla energia 60 MeV).

Tabela 15.2: Wartości kątów α_1 i α_2 oraz współczynnika r dla modulatorów dostosowanych do wiązek protonów o poszczególnych energiach.

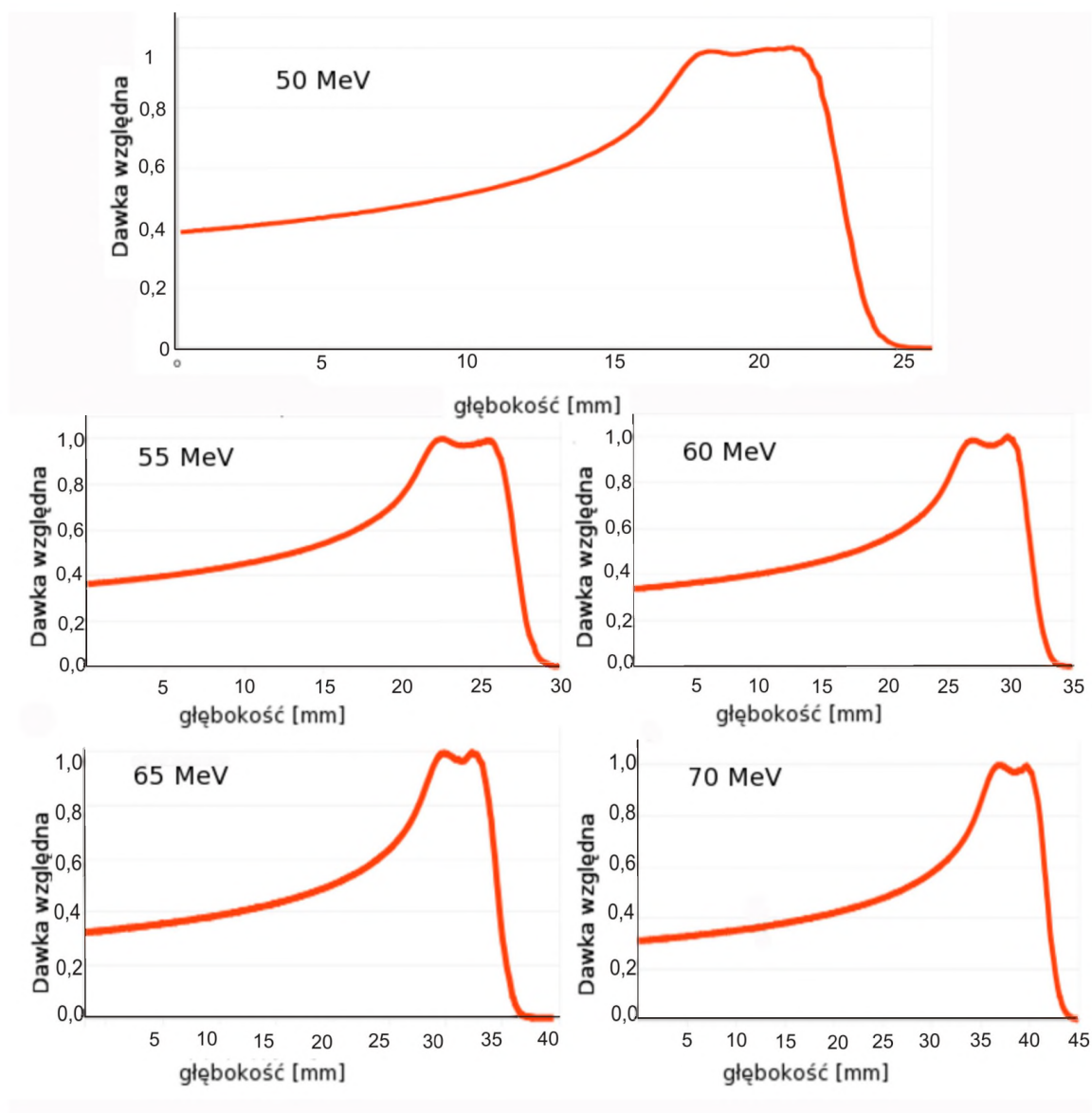
Energia średnia [MeV]	α_1 [°]	α_2 [°]	r
50	82,11	67,37	0,02
55	72,84	76,01	0,03
60	66,83	77,6	0,03
65	58,17	82,32	0,03
70	58,24	81,98	0,03



Rys. 15.6: Zestawienie rozkładów dawki uzyskanych przez proste dodanie do siebie rezultatów symulacji z absorbentami i bez (rysunki A i C) oraz rozkładów uzyskanych zgodnie ze wzorem 15.2 (rysunki B i D). Badane energie to 65 MeV (A i B) oraz 70 MeV (C i D).



Rys. 15.7: Wizualizacja ułożeń uproszczonego modulatora energii w czasie obrotu.



Rys. 15.8: Rozkład dawki na głębokości uzyskany w wyniku obrotu uproszczonego modulatora energii dla energii 50 MeV, 55 MeV, 60 MeV, 65 MeV i 70 MeV.

Tabela 15.3: Zestawienie współczynników r uzyskanych poprzez symulację obrotu uproszczonego koła modulacyjnego dla różnych energii średnich wiązki protonów.

Energia średnia [MeV]	r
50	0,04
55	0,03
60	0,04
65	0,04
70	0,03

Rozdział 16

Symulacje rzeczywistego modulatora zasięgu

W rozdziale dwunastym, pod tytułem "Przejście wiązki protonów przez warstwę absorbenta", opisany został wpływ warstwy PMMA na rozkład dawki na głębokości. Wyniki te zostały wykorzystane podczas projektowania modulatora energii, który zbudowany jest właśnie z warstw o różnych grubościach. Symulacja dla każdej warstwy wykonana była dla miliona cząstek. W obliczeniach nie była uwzględniana dawka względna dla każdej grubości warstwy absorbującej, ale wartości energii, jakie zostały zdeponowane na poszczególnych głębokościach.

Wymiary poszczególnych wycinków walca, tworzących modulator wykorzystany na stanowisku terapii protonowej IFJ PAN w Krakowie, znajdują się w tabeli 16.1, a zależność zdeponowanej energii od głębokości pokazuje wykres 16.1.

Aby przeprowadzić symulacje odzwierciedlające pracę koła modulacyjnego, nie wystarczy w prosty sposób dodać do siebie wartości energii, zdeponowanych przez poszczególne wiązki. Rozkład, uzyskany przez proste sumowanie, daleki jest od pożądanego i nie umożliwia pokrycia obszaru napromienianego jednorodną dawką (rys. 16.2). Aby umożliwić uzyskanie właściwego rozkładu dawki, modulator zasięgu musi być skonstruowany w ten sposób, aby poszczególne wycinki walca, wchodzące w jego skład miały ściśle określone kąty rozwarcia. Wartości kątów dla badanego modulatora, uwzględnione w programie, zostały obliczone w IFJ PAN w Krakowie. Wykres, znajdujący się na rysunku 16.4 uwzględnia wielkości kątów. Każda wartość energii, zdeponowanej w detektorze logicznym, została najpierw pomnożona przez wartość

Tabela 16.1: Wymiary modulatora zasięgu, używanego na stanowisku terapii protonowej w IFJ PAN Kraków.

Numer wiązki	Grubość absorbenta [mm]	Kąt [°]
1	0	10,32
2	0,8	3,52
3	1,61	2,92
4	2,42	2,44
5	3,23	2,21
6	4,03	2,05
7	4,84	1,99
8	5,64	1,91
9	6,45	1,91
10	7,25	1,85
11	8,06	1,89
12	8,87	1,93
13	9,68	1,93
14	10,48	1,97
15	11,29	2
16	12,1	1,97
17	12,9	2,21

kąta, a następnie tak uzyskane wartości zostały do siebie dodane i unormowane do jedności, zgodnie ze wzorem:

$$D_i = \frac{\sum_{j=1}^{16} D_{ij} \cdot \alpha_j}{D_{max}}, \quad (16.1)$$

gdzie:

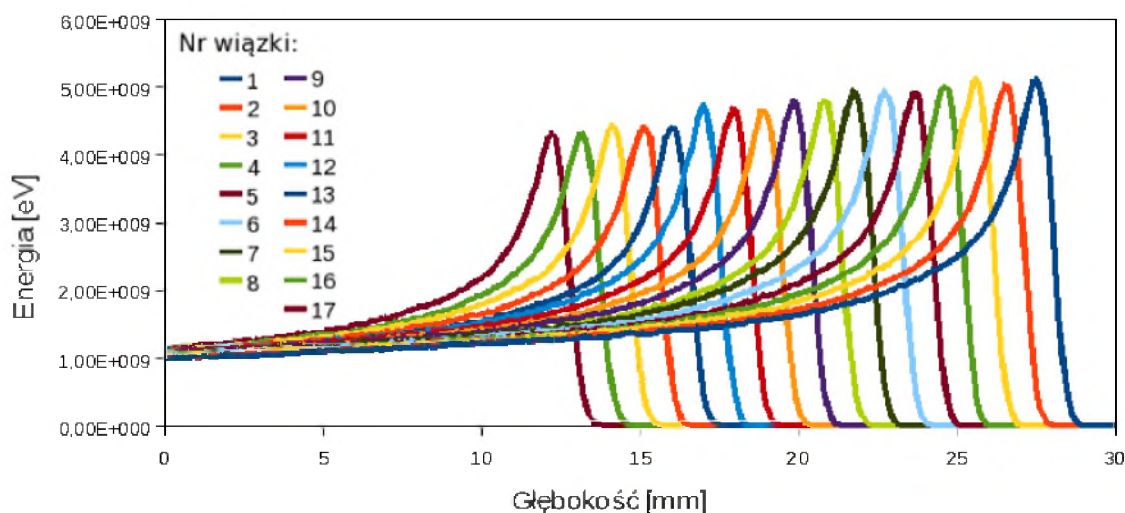
D_i - dawka względna uzyskana dla i -tego detektora logicznego,

D_{ij} - energia zdeponowana przez j wiązkę w i detektorze logicznym,

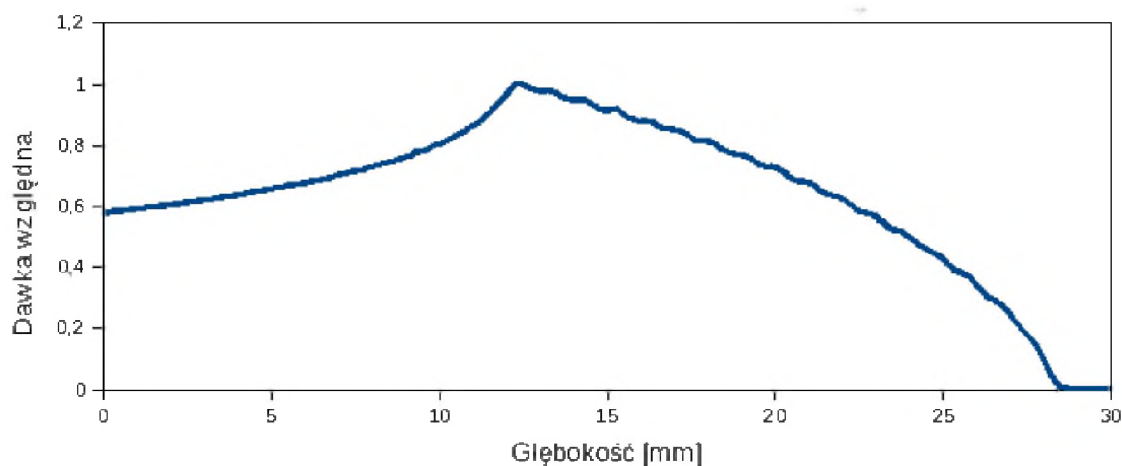
α_j - kąt rozwarcia wycinka walca, odpowiadający wiązce numer j (tabela 16.1),

D_{max} - dawka maksymalna.

Podczas projektowania uproszczonego modulatora z poprzedniego rozdziału



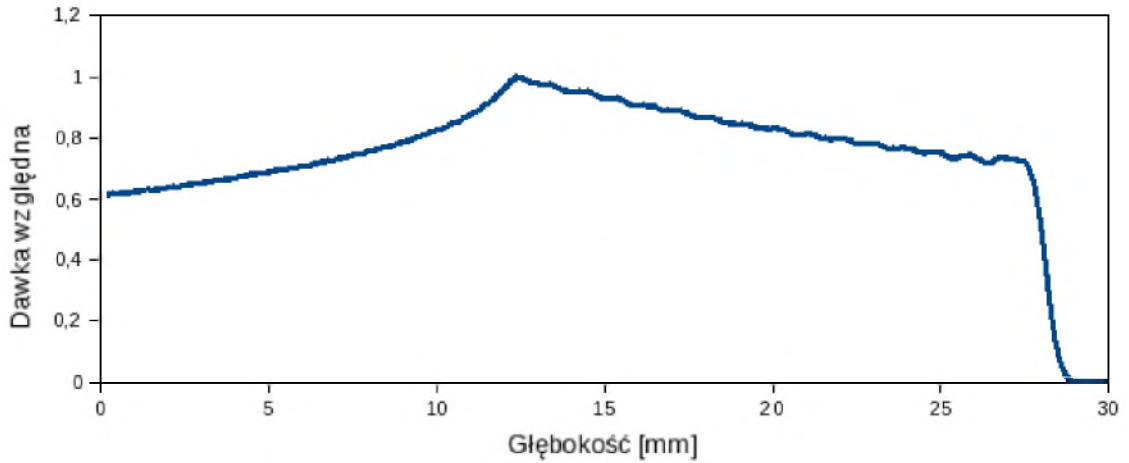
Rys. 16.1: Energie zdeponowane przez wiązki w detektorach logicznych.



Rys. 16.2: Rozkład dawki na głębokości uzyskany poprzez dodanie do siebie energii, zdeponowanej przez wiązki, przechodzące przez różne warstwy PMMA. Suma energii została unormowana do jedynki. Rozkład ten nie jest jednorodny w obszarze napromienianym.

uwzględnienie odpowiednich proporcji między wiązkami wystarczyło, aby uzyskać oczekiwany rozkład. Jednak rzeczywistość jest bardziej skomplikowana i poszerzony pik Bragga okazał się być "pochylony" (rysunek 16.3). Zaistniała konieczność napisania dokładniejszego programu symulacyjnego. Trzeba zastanowić się dokładniej, jak wykonywany był pomiar i dopasować jeszcze lepiej program symulacyjny do tego, co działo się na stanowisku terapeutycznym w czasie rejestracji rozkładu dawki.

Wyniki pomiarowe, które stanowią punkt odniesienia dla symulacji, uzyskane



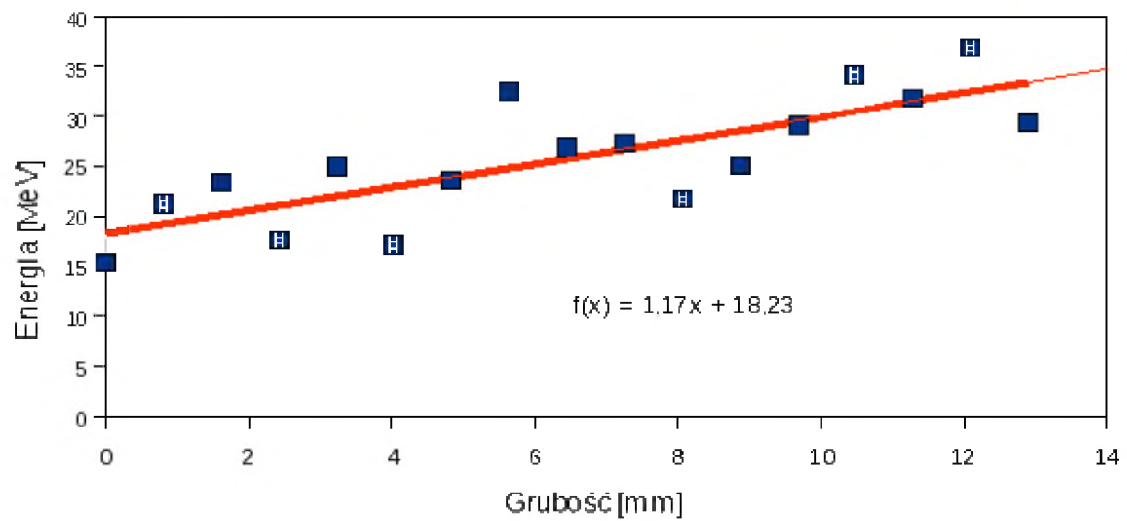
Rys. 16.3: Rozkład dawki dla sumy wiązek pomnożonych przez wartości kątów dla poszczególnych wycinków walca, tworzących modulator. Rozkład dawki nadal nie jest zgodny z oczekiwaniami.

były poprzez podzielenie wskazania komory Markus przez wskazanie komory przelotowej, znajdującej się na torze wiązki. Udoskonalona wersja programu symulacyjnego musi więc uwzględniać także komorę przelotową. W poprzedniej wersji programu była ona biernym elementem, przez który wiązka przechodziła tracąc nieznacznie energię. Dokładniejszy program różni się tym, że powietrze, wypełniające komorę, zostało zdefiniowane jako objętość detektora logicznego, dzięki czemu w pliku wynikowym znajduje się wartość energii, jaką wiązka protonów zdeponowała w komorze (rys. 16.4). Symulacje te, ze względu na stosunkowo niewielką gęstość powietrza oraz związaną z tym małą ilość centrów oddziaływania z protonami, obdarzone są większym błędem statystycznym, niż symulacje głębokościowego rozkładu dawki, gdzie ośrodkiem rejestrującym dawkę jest woda. Do symulowanych wskazań komory przelotowej w zależności od grubości warstwy PMMA dopasowano prostą, z równania której obliczono współczynniki, przez które podzielono energię, zdeponowaną w detektorach logicznych, zgodnie ze wzorem:

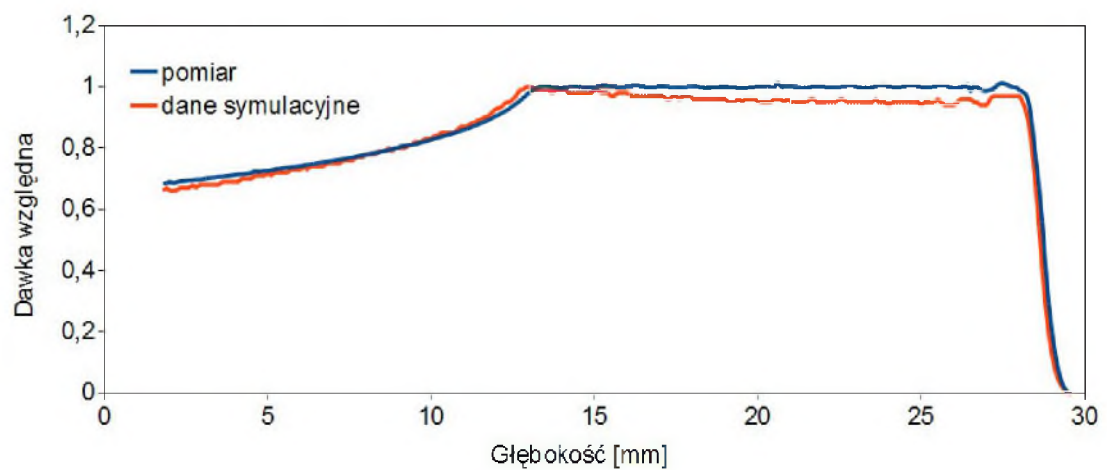
$$D_i = \sum_{j=1}^{16} \frac{D_{ij} \cdot \alpha_j}{k_j \cdot D_{max}}, \quad (16.2)$$

gdzie k_j oznacza wskazanie komory przelotowej dla wiązki j .

Uzyskany w ten sposób rozkład dawki na głębokości różni się od zmierzonego o 4,1%, co oznacza, że uzyskano zadowalającą zgodność danych symulacyjnych i pomiarowych (rys. 16.5).



Rys. 16.4: Energia zdeponowana w komorze przelotowej w zależności od grubości warstwy PMMA.



Rys. 16.5: Poszerzony pik Bragga uzyskany dzięki symulacjom komputerowym zestawiony z rozkładem dawki na głębokości dla modulatora energii uzyskanym poprzez pomiary dozymetryczne na stanowisku terapii protonowej oka.

Rozdział 17

Wykorzystanie bibliotek GEANT4 w projektowaniu modulatorów energii

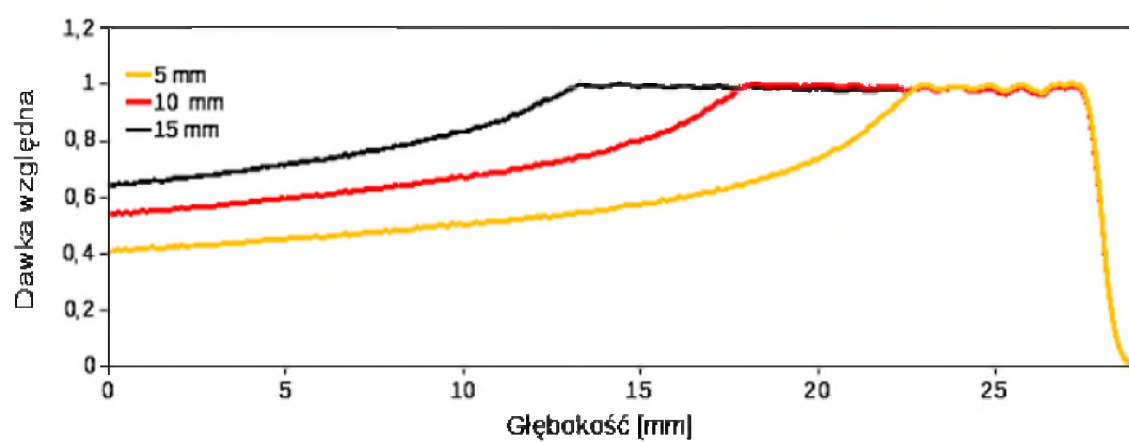
W rozdziale szesnastym, pod tytułem "Symulacje rzeczywistego modulatora zasięgu" zaprezentowano, w jaki sposób można przeprowadzić symulacje koła modulacyjnego. Obliczenia opierały się na danych pomiarowych uzyskanych w IFJ PAN w Krakowie oraz na rzeczywistych wymiarach przykładowego modulatora. Powtarzając tok rozumowania opisany w poprzednim rozdziale, można wykorzystać pakiet GEANT4 w projektowaniu innych modulatorów zasięgu. W tabeli 17.1 znajdują się grubości absorbenta wykonanego z PMMA oraz kąty rozwarcia wycinków walca dla trzech różnych modulatorów. Dla pierwszego z nich przyjęto, że obszar napromieniowany ma mieć szerokość 15 mm, dla drugiego 10 mm, a dla trzeciego 5 mm. Założono, że w każdym przypadku obszar napromieniowany ma być pokryty dawką większą niż 95% dawki maksymalnej. Rozkłady dawki, obliczone dzięki tym założeniom, znajdują się na wykresie 17.1. Można zauważyć, że dla mniejszej szerokości nowotworu konstrukcja modulatora może być prostsza, gdyż wystarczy mniej wycinków walca, aby pokryć obszar guza w przybliżeniu jednorodnym rozkładem dawki (tabela 17.2). Mniejsza jest także dawka względna na wejściu. Gdy nowotwór ma 15 mm, dawka względna na wejściu wynosi 64% dawki maksymalnej, dlatego pacjenci z bardziej rozległymi zmianami nowotworowymi odnoszą wiele korzyści dzięki napromienianiu z kilku kierunków, co jest możliwe przy zastosowaniu gantry.

Tabela 17.1: Wymiary przykładowych modulatorów zasięgu zaprojektowanych dla różnych szerokości obszaru napromienianego (15 mm, 10 mm i 5 mm).

Grubość absorbenta	Kąty dla różnych modulatorów [°]		
	modulator 1	modulator 2	modulator 3
0	10,79	13,58	19,16
0,8	3,77	4,63	6,53
1,61	3,14	3,95	5,57
2,42	2,62	3,29	4,64
3,23	2,41	3,03	4,08
4,03	2,14	2,76	4,08
4,84	1,99	2,7	0,93
5,64	1,99	2,7	-
6,45	1,99	2,63	-
7,25	1,99	2,5	-
8,06	1,99	2,57	-
8,87	1,94	0,66	-
9,68	1,94	-	-
10,48	1,94	-	-
11,29	1,94	-	-
12,1	1,94	-	-
12,9	0,52	-	-

Tabela 17.2: Wymiary przykładowych modulatorów zasięgu zaprojektowanych dla różnych szerokości obszaru napromienianego (15 mm, 10 mm i 5 mm).

Szerokość obszaru napromienianego [mm]	15	10	5
Dawka względna na wejściu	0,64	0,54	0,41
Ilość wycinków walca tworzących modulator	16	11	6



Rys. 17.1: Rozkład dawki na głębokości dla modulatorów energii, które wykorzystane są do napromieniania obszaru o szerokościach 15 mm, 10 mm i 5 mm.

Rozdział 18

Wnioski

Pakiet GEANT4 okazał się użytecznym narzędziem, pozwalającym na przeprowadzenie symulacji zjawisk, zachodzących na stanowisku terapii protonowej IFJ PAN w Krakowie. Dzięki wykorzystaniu pakietu można obliczyć zarówno rozkład dawki na głębokości, jak i poprzeczny profil wiązki. Uzyskane wyniki z dobrą zgodnością odzwierciedlają rzeczywisty wynik pomiaru, pod warunkiem przyjęcia właściwych założeń odnośnie geometrii programu, rozkładu energetycznego oraz przyjętego modelu oddziaływań.

Plik opisujący geometrię powinien zawierać wszystkie niezbędne składniki stanowiska terapeutycznego, takie jak: okienko kaptonowe, folia rozpraszająca, okienko PET oraz komory jonizacyjne. W symulacji profilu wiązki powinno się także umieścić w programie kolimator końcowy. Program powinien uwzględniać, że w rzeczywistości pomieszczenie terapeutyczne wypełnione jest powietrzem. Dołożenie każdego kolejnego elementu geometrii powodowało przesunięcie się piku Bragga w stronę mniejszych głębokości i wzrost dawki względnej na wejściu. Nieznaczny wpływ na rozkład dawki na głębokości wykazuje okienko kaptonowe i folia rozpraszająca, które zmieniają głębokość piku Bragga jedynie o 0,1 mm i 0,2 mm. Na podstawie symulacji można stwierdzić, że system monitorowania wiązki przesuwa głębokość występowania dawki maksymalnej o 1,3 mm, a powietrze w pomieszczeniu terapeutycznym - o 1,7 mm.

Symulacje komputerowe umożliwiają zbadanie wpływu elementów, przez który przechodzi wiązka protonów, na profil poprzeczny wiązki. Okienko kaptonowe nie wpływa znacząco na profil poprzeczny, natomiast komory jonizacyjne i powietrze wypełniające pomieszczenie terapeutyczne poszerzają wiązkę odpowiednio 2,7

i 3,3 razy. Największe znaczenie ma tantalowa folia rozpraszająca, która umożliwia uzyskanie niemal jednorodnego rozkładu dawki. Istotnym elementem jest także kolimator końcowy, który wycina odpowiedni fragment wiązki.

Ważny jest także odpowiedni rozkład energetyczny wiązki protonów. Dobierany jest tak, aby uzyskana została największa zgodność symulacji z wynikiem pomiaru. Ponieważ cyklotron nie emituje protonów o dokładnie tych samych energiach, nie ma możliwości napisania dobrego programu symulacyjnego posługując się założeniem, że wiązka jest monoenergetyczna. Pewnym przybliżeniem rzeczywistego rozkładu energetycznego wiązki protonów jest rozkład Gaussa. Był on testowany dla różnych energii średnich i odchyłeń standardowych, jednak sukces osiągnięty dla tego rozkładu jest jedynie częściowy. Przykładowo dla energii średniej 60,2 MeV i odchylenia standardowego 0,2 MeV uzyskano dobrą zgodność w obszarze piku Bragga, ale duże odstępstwa na mniejszych głębokościach. Gdy odchylenie standardowe zwiększy się do wartości 0,4 MeV, zgodność dla obszaru plateau jest większa, ale wynik symulacji znacznie odstaje od pomiaru dla większych głębokości. Z tego wniosek, że rozkład energetyczny protonów w wiązce nie jest symetryczny i występuje (w porównaniu z rozkładem Gaussa) niedobór cząstek o największych energiach. Dlatego korzystny efekt osiąga się, opisując energię rozkładem normalnym przy jednoczesnym umieszczeniu w pliku instrukcji warunkowej, która wycina cząstki o najwyższych energiach. Taka definicja rozkładu energetycznego zapewnia szybki spadek dawki za pikiem Bragga, przy jednoczesnym zapewnieniu dobrej zgodności dla mniejszych głębokości. Gdy w programie wprowadzono rozkład o maksimum dla energii 60,5 MeV, o odchyleniu standardowym 0,5 MeV, dla którego zrezygnowano z symulacji protonów o energii większej niż 60,7 MeV, uzyskano średnie odchylenie symulacji od danych pomiarowych na poziomie 4,3%. Zgodność ta jest zadowalająca, jednak można zauważyć, że dla niewielkich głębokości dawka względna jest niższa niż dla danych pomiarowych. Rozwiązaniem tego problemu jest umieszczenie w wiązce niewielkiej liczby protonów o energiach znacznie niższych niż 60 MeV. Jeszcze lepszą zgodność między symulacją a pomiarem można uzyskać opisując energię protonów za pomocą histogramu, który określałby ilość cząstek o energii należącej do danego przedziału. W pracy opisano przykład, gdzie najwięcej cząstek miało energię w przedziale (60,4; 60,5), ale nie brakowało protonów o energiach między 16 MeV a 60 MeV. Protony o energii większej niż 60,6 MeV nie były brane pod uwagę. Dla takiego rozkładu różnica między symulacją a pomiarem wynosiła średnio 1,1%.

Porównano także wiązkę równoległą i przyjmującą kształt stożka, a zauważone różnice w dawce względnej były średnio na poziomie 2,6%, tak więc kształt wiązki w opisanym przypadku nie odgrywa znaczącej roli dla głębokościowego rozkładu dawki.

Wynik symulacji zależy także od przyjętego modelu oddziaływań. Przy energii protonów około 60 MeV konieczne jest uwzględnienie reakcji jądrowych. Co prawda terapeutyczna wiązka protonów oddziałuje głównie z powłokami elektronowymi, jednak dołączenie reakcji jądrowych umożliwia uzyskanie rezultatu zgodnego w większym stopniu z danymi pomiarowymi. Włączenie reakcji jądrowych sprawia, że zwiększa się dawka względna na wejściu.

Przeprowadzono także symulacje, w których uwzględniono materiały i kształt komory Markus, jaka posłużyła do zarejestrowania rozkładu dawki na stanowisku terapeutycznym w fantomie wodnym. Symulacja ta była dość dokładnym obrazem rzeczywistego pomiaru. Jej wyniki porównano z prostszą symulacją, gdzie protony rejestrowane były w detektorach logicznych wypełnionych wodą. Okazało się, że dla dokładnej symulacji komory Markus uzyskano mniejszą dawkę względną na wejściu niż dla uproszczonego układu detekcyjnego. Różnica ta stanowi około 3% dawki maksymalnej. Przyczyną powstania różnicy jest większe prawdopodobieństwo reakcji jądrowych w wodzie, niż dla PMMA i powietrza, które wchodzi w skład komory Markus. Woda zawiera więcej atomów tlenu, dla którego wysokie są przekroje czynne na reakcje jądrowe. Symulacje, w których nie uwzględniono reakcji jądrowych, dają taki sam rozkład dawki na głębokości, bez względu, czy układ detekcyjny jest dokładniej czy mniej dokładnie odwzorowany. Symulacje komory Markus są bardziej czasochłonne i wymagają więcej mocy obliczeniowej, dlatego gdy nie jest wymagana bardzo wysoka precyzja wyniku, można korzystać z uproszczonego układu detekcyjnego.

Przebadano także wpływ warstwy absorbenta z PMMA na rozkład dawki na głębokości. Dla każdego milimetra PMMA głębokość piku Bragga przesuwała się w stronę mniejszych głębokości o 1,18 mm. Wraz ze wzrostem grubości absorbenta rosła dawka względna na wejściu oraz malała energia zdeponowana przez wiązkę w detektorach wodnych. Symulacje te były wstępem do symulacji poszerzonego piku Bragga.

Przeprowadzono także symulacje modulatora zasięgu o znanej geometrii. Aby uzyskać wynik zgodny z pomiarem, konieczne było uwzględnienie w programie sy-

mulacyjnym wskazania komory przelotowej, przez które dzielone są wyniki pomiaru za pomocą komory Markus.

Ponadto zaprojektowano przykładowe modulatory, które pokrywały w przybliżeniu jednorodnym rozkładem dawki obszary o szerokości 15 mm, 10 mm i 5 mm. Im większy obszar napromieniany, tym większa dawka względna na wejściu, dlatego przy dużych zmianach nowotworowych (np. w mózgu) pacjenci napromieniowani są z kilku kierunków z wykorzystaniem gantry.

Spis rysunków

2.1	Rozkład dawki na głębokości dla wiązki protonów o energii 60 MeV zmierzony w wodzie. Pojedynczy pik Bragga oznaczono kołami, a poszerzony pik Bragga- kwadratami. Pomiar wykonany był w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie [2].	9
2.2	Zasięgowy charakter absorpcji ciężkich cząstek naładowanych. Średni zasięg \bar{R} oznacza głębokość, dla której liczba cząstek spada o połowę, a R_e - zasięg ekstrapolowany, stanowiący odległość odpowiadającą przecięciu z osią X stycznej do krzywej N(x) w punkcie odpowiadającym połowie wysokości tej krzywej [7].	9
2.3	Zasięg ciężkich cząstek naładowanych w wodzie w funkcji energii początkowej wiązki [6].	10
2.4	Szerokość wiązki ciężkich cząstek naładowanych (FWHM), w funkcji głębokości w fantomie wodnym [6].	11
2.5	Rozpraszanie cząstek naładowanych w materiale o grubości L [10]. . .	12
2.6	Całkowite przekroje czynne dla reakcji protonów z wybranymi pierwiastkami [11].	13
3.1	Rozkłady dawki na głębokości dla wiązki fotonów (16 MV, pole 10cm x 10 cm), protonów o energii 200 MeV oraz wiązki protonów modulowanej w celu uzyskania poszerzonego piku Bragga o szerokości 5 cm [23].	15
3.2	Poszerzony pik Bragga (SOBP powstaje poprzez sumowanie rozkładów dawki pochodzących od wiązek o malejących energiach i malejącym natężeniu [23].	16
3.3	Pasywny system kształtowania wiązki [23].	17

3.4	Aktywny system kształtowania wiązki. Wiązka protonów przesuwana jest dzięki odpowiednio dobranym parametrom prostopadłych pól magnetycznych i napromienia poszczególne woksele po kolei [21]. . . .	17
3.5	Gantry w Centrum Cyklotronowym Bronowice. Strona widoczna dla serwisu (A) i dla pacjenta (B) [15].	18
3.6	Porównanie rozkładu dawki dla terapii protonowej (IMPT-Intensity Modulated Proton Therapy) oraz tomoterapii z wykorzystaniem wiązki fotonów (HT-helical tomotherapy)[20].	19
4.1	Cyklotron izochroniczny AIC 144 [36]	24
4.2	System transportu wiązki [37]	25
4.3	Stanowisko terapii protonowej [35]	26
4.4	Dyskryminator zasięgu.	27
4.5	Modulator zasięgu.	28
4.6	Komora czterosegmentowa i dwupięścieniowa oraz komory przelotowe [26].	28
4.7	Kolimator końcowy.	29
4.8	Fotel pacjenta [27].	30
4.9	Napromienianie pacjenta wiązką protonów. Na schemacie zaznaczono lampkę pozycjonującą i kamerę. [26].	31
4.10	Pomiar rozkładu dawki w fantomie wodnym [26].	31
4.11	Cyklotron Proteus C-235 [26].	32
4.12	Schemat prowadzenia wiązki w Centrum Cyklotronowym Bronowice IFJ PAN [28]	33
6.1	Stanowisko terapii hadronowej w Catani (A) oraz geometria programu symulacyjnego (B) [32].	40
6.2	Poszerzony pik Bragga dla protonów (A) oraz pik Bragga dla jonów węgla (B) uzyskane za pomocą symulacji oraz pomiarów [30].	40
6.3	Schemat programu symulacyjnego oraz zdjęcia rzeczywistych elementów kształtujących wiązkę protonów [33].	41
6.4	Schemat przedstawiający różne możliwe do wyboru warianty geometrii programu symulacyjnego [33].	42

6.5	Rozkład dawki na głębokości zmierzony w National Cancer Center w Japonii (puste koła) oraz uzyskany za pomocą symulacji. Kolorem czerwonym oznaczone są symulacje dla wiązki stożkowej, a kolorem niebieskim- dla równoległej [33].	43
6.6	Zależność rozkładu głębokościowego dawki dla protonów o energii 230 MeV w wodzie uzyskana za pomocą kodów GEANT4, MCNPX i PHITS [34].	44
6.7	Porównanie pomiędzy zmierzonymi i symulowanymi rozkładami dawki na głębokości dla wiązki o energii 98,71 MeV (a) i 227,65 MeV (b). Zielonymi punktami oznaczono względny błąd dla każdego punktu [34].	45
6.8	Profile poprzeczne dla wiązki o energii 210,56 MeV na różnych głębokościach w fantomie z PMMA [34].	46
8.1	Schemat geometrii stanowiska terapeutycznego. Proporcje stanowiska nie są zachowane na rysunku.	53
9.1	Rozkład dawki na głębokości dla różnych wariantów geometrii programu symulacyjnego.	55
9.2	Zestawienie rozkładów dawki uzyskanej za pomocą programów z najprostszą i najbardziej złożoną geometrią z danymi pomiarowymi. . . .	57
10.1	Rozkład dawki na głębokości dla monoenergetycznych wiązek protonów o energiach 57 MeV, 58 MeV, 59 MeV, 60 MeV i 61 MeV.	59
10.2	Rozkład dawki na głębokości dla wiązki protonów, których widmo energetyczne opisane jest rozkładem normalnym, ze energią średnią 60 MeV i odchyleniem standardowym wynoszącym: 0 MeV, 0,2 MeV, 0,4 MeV, 0,6 MeV, 0,8 MeV i 1,0 MeV.	60
10.3	Rozkład dawki na głębokości dla wiązki protonów o energii 60,2 MeV i rozmyciach energetycznych 0,2 i 0,4 MeV. Na wykresie widać także dane pomiarowe.	61

10.4	Rozkład dawki na głębokości dla wiązki protonów o rozkładzie energetycznym będącym modyfikacją rozkładu Gaussa o energii średniej 60 MeV i odchyleniu standardowym 0,5 MeV. Dla każdej z wiązek różne są maksymalne energie protonów, które wynoszą odpowiednio 60,2 MeV, 60,3 MeV i 62 MeV. Rozkład dawki dla mniejszych głębokości jest taki sam dla każdego z omawianych rozkładów energetycznych, natomiast w obszarze spadku dawki za pikiem Bragga można zauważyć, że im większa jest maksymalna energia wiązki, tym większa jest głębokość, dla której dawka względna spada do zera.	63
10.5	Rozkład dawki na głębokości dla wiązki protonów o rozkładzie energetycznym opisanym histogramem. Symulację zestawiono z danymi pomiarowymi.	66
10.6	Rozkłady energetyczne wiązki protonów. Kolorem brązowym oznaczono rozkład energetyczny źródła protonów, zdefiniowany w programie symulacyjnym. Pozostałe wykresy przedstawiają rozkłady energetyczne zarejestrowane w fantomie wodnym na różnych głębokościach. Rozkłady zostały unormowane do jedynki.	67
11.1	Głębokościowy rozkład dawki dla wiązki protonów w wodzie w przypadku, gdy źródło protonów emituje wiązkę równoległą, a także, gdy wiązka przyjmuje kształt stożka.	70
12.1	Rozkłady dawki na głębokości dla wiązek, które przeszły przez warstwy PMMA o różnych grubościach zestawione z rozkładem dla wiązki, która nie przeszła przez płytkę absorbującą (wiązka nr 1).	72
12.2	Wykres zależności głębokości dawki maksymalnej od grubości absorbenta. Im grubsza jest warstwa PMMA, tym mniejsza jest głębokość, na której występuje pik Bragga.	74
13.1	Schematy geometrii programów symulacyjnych: detektorów logicznych wypełnionych wodą (A) i komory Markus (B).	76
13.2	Porównanie rozkładów dawki uzyskanych dzięki symulacji komory Markus oraz dzięki symulacji prostych detektorów logicznych wypełnionych wodą. Symulacje były wykonywane w dwóch wersjach oddziaływań: z uwzględnieniem reakcji jądrowych a także bez nich. . . .	80

14.1	Fragment wizualizacji programu symulującego profil wiązki, na którym widać kolimator końcowy (kolor niebieski i różowy). Kolorem pomarańczowym oznaczono detektory logiczne, rejestrujące energię protonów. Ciemnoniebieskie linie to tory protonów, a czerwone - tory elektronów, uwolnionych w wyniku oddziaływania wiązki protonów z materia.	82
14.2	Profil wiązki dla różnych wariantów geometrii programu symulacyjnego.	83
14.3	Profil poprzeczny dla wiązki protonów uzyskany za pomocą symulacji komputerowych (kolor czerwony) i pomiarów (kolor granatowy). . . .	84
15.1	Schemat uproszczonego modulatora energii: dwa wycinki walca o wysokościach h i $0,5h$ oraz kątach rozwarcia α_1 i α_2	86
15.2	Schemat geometrii programu symulacyjnego.	86
15.3	Wizualizacja programu symulacyjnego. Kolorem żółtym oznaczono detektory logiczne, kolorem czerwonym- modulator energii, a kolorem niebieskim- wiązkę protonów.	87
15.4	Rozkład dawki na głębokości dla wiązki protonowej o energii 50 MeV w trzech przypadkach: bez warstwy pochłaniającej (kolor niebieski) oraz z warstwami przesuwającymi pik Bragga o 2 mm (kolor zielony) i 4 mm (kolor fioletowy). Na wykresie zaznaczono także sumę wiązek (kolor czerwony). Na rysunku A wiązki protonów dodane są do siebie w prosty sposób, a na rysunku B- wiązki przed zsumowaniem pomnożone są przez odpowiednie wagi, a i b.	89
15.5	Rysunki A i C przedstawiają rozkłady dawki, uzyskane poprzez dodanie do siebie energii zdeponowanej przez wiązki protonów o energii 55 MeV, które nie przechodziły przez absorbent, a także tych, które pokonały warstwę PMMA o grubości $0,5h$ i h . Na rysunku A badana energia to 55 MeV, a na rysunku C- 60 MeV. Poniżej znajdują się sumy wiązek pomnożonych przez właściwe współczynniki a i b (rysunek B- energia 55 MeV, a rysunek D- dla energia 60 MeV). . . .	90
15.6	Zestawienie rozkładów dawki uzyskanych przez proste dodanie do siebie rezultatów symulacji z absorbentami i bez (rysunki A i C) oraz rozkładów uzyskanych zgodnie ze wzorem 15.2 (rysunki B i D). Badane energie to 65 MeV (A i B) oraz 70 MeV (C i D).	91

15.7	Wizualizacja ułożeń uproszczonego modulatora energii w czasie obrotu.	91
15.8	Rozkład dawki na głębokości uzyskany w wyniku obrotu uproszczonego modulatora energii dla energii 50 MeV, 55 MeV, 60 MeV, 65 MeV i 70 MeV.	92
16.1	Energie zdeponowane przez wiązki w detektorach logicznych.	96
16.2	Rozkład dawki na głębokości uzyskany poprzez dodanie do siebie energii, zdeponowanej przez wiązki, przechodzące przez różne warstwy PMMA. Suma energii została unormowana do jedynki. Rozkład ten nie jest jednorodny w obszarze napromienianym.	96
16.3	Rozkład dawki dla sumy wiązek pomnożonych przez wartości kątów dla poszczególnych wycinków walca, tworzących modulator. Rozkład dawki nadal nie jest zgodny z oczekiwaniami.	97
16.4	Energia zdeponowana w komorze przelotowej w zależności od grubości warstwy PMMA.	98
16.5	Poszerzony pik Bragga uzyskany dzięki symulacjom komputerowym zestawiony z rozkładem dawki na głębokości dla modulatora energii uzyskanym poprzez pomiary dozymetryczne na stanowisku terapii protonowej oka.	98
17.1	Rozkład dawki na głębokości dla modulatorów energii, które wykorzystane są do napromieniania obszaru o szerokościach 15 mm, 10 mm i 5 mm.	101

Spis tabel

3.1	Ośrodki terapii protonowej na świecie [14].	20
9.1	Zestawienie dawki względnej na wejściu oraz głębokości, na której znajduje się pik Bragga dla różnych wariantów geometrii programu symulacyjnego.	56
10.1	Porównanie głębokości występowania piku Bragga oraz dawki względnej na wejściu dla różnych energii wiązki protonów.	59
10.2	Porównanie głębokości występowania piku Bragga oraz dawki względnej na wejściu dla wiązki protonów o energii średniej 60 MeV i różnych odchyleniach standardowych.	61
10.3	Porównanie głębokości występowania piku Bragga, dawki względnej na wejściu oraz głębokości, dla której dawka wynosi 1% dawki maksymalnej (głębokość spadku dawki) dla wiązki protonów o rozkładzie przyjmującym maksimum dla energii 60 MeV, odchyleniu standardowym 0,5 MeV i różnych energiach maksymalnych.	62
10.4	Prawdopodobieństwa występowania energii w poszczególnych przedziałach.	64
12.1	W tabeli zestawiono informacje na temat rozkładów głębokościowych dla wiązek protonów po przejściu przez warstwy PMMA o różnych grubościach.	73

13.1	Rozkład dawki uzyskany w wyniku symulacji komory Markus w dwóch wariantach oddziaływań: z uwzględnieniem reakcji jądrowych, a także bez nich.	76
13.2	Zestawienie dawki względnej na wejściu oraz głębokości występowania dawki maksymalnej dla symulacji komory Markus i symulacji z uproszczonymi detektorami wodnymi.	79
14.1	Zestawienie szerokości rozkładu dawki w połowie wysokości dla różnych wariantów geometrii programu symulacyjnego.	83
15.1	Wyniki symulacji zmiany położenia piku Bragga w zależności od grubości warstwy absorbenta z PMMA dla różnych energii średnich wiązki protonów. W tabeli umieszczono głębokość występowania dawki maksymalnej dla badanej wiązki protonów, głębokość po przejściu protonów przez warstwę PMMA, a także grubość warstwy h , jaka została wykorzystana w dalszych obliczeniach.	87
15.2	Wartości kątów α_1 i α_2 oraz współczynnika r dla modulatorów dostosowanych do wiązek protonów o poszczególnych energiach.	90
15.3	Zestawienie współczynników r uzyskanych poprzez symulację obrotu uproszczonego koła modulacyjnego dla różnych energii średnich wiązki protonów.	93
16.1	Wymiary modulatora zasięgu, używanego na stanowisku terapii protonowej w IFJ PAN Kraków.	95
17.1	Wymiary przykładowych modulatorów zasięgu zaprojektowanych dla różnych szerokości obszaru napromienianego (15 mm, 10 mm i 5 mm).	100
17.2	Wymiary przykładowych modulatorów zasięgu zaprojektowanych dla różnych szerokości obszaru napromienianego (15 mm, 10 mm i 5 mm).	100

Bibliografia

- [1] Robert R. Wilson, *Radiological Use of Fast Protons*, Radiology, volume 47, issue 5, listopad 1946, 487-491.
- [2] J. Swakon, P. Olko, D. Adamczyk, T. Cywicka-Jakiel, J. Dabrowska, B. Dulny, L. Grzanka, T. Horwacik, T. Kajdrowicz, B. Michalec, T. Nowaka, M. Ptaszkiewicz, U. Sowa, L. Stolarczyk, M.P.R. Waligorski, *Facility for proton radiotherapy of eye cancer at IFJ PAN in Krakow*, Radiation Measurements 45 (2010), 1469-1471.
- [3] <http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mfj/wyklad/w2/segment4/main.htm>
- [4] <http://www.if.pw.edu.pl/~fornal/bethe-bloch/Bethe-Bloch/>
- [5] H. Paganetti, T. Bortfeld, *Proton Beam Radiotherapy - The State of the Art*, New Technologies in Radiation Oncology (Medical Radiology Series), Heidelberg, ISBN 3-540-00321-5, październik 2005.
- [6] J. Debus et al., *Proposal for a dedicated ion beam facility for cancer therapy*, GSI Darmstadt, wrzesień 1998.
- [7] <http://www.if.pw.edu.pl/~pluta/pl/dyd/mtj/wyklad/w3/segment3/main.htm>
- [8] Ryszard Feldmann, *Narządy zmysłów*, atykuł dla serwisu *RES MEDICA*, <http://www.resmedica.pl/rmart0009.html>
- [9] Y.Matsuzaki, H. Date, K.L. Sutherland, Y. Kiyanagi Y, *Nuclear collision processes around the Bragg peak in proton therapy*, Radiol Phys Technol.3(1):84-92, styczeń 2010.

- [10] S. Tavenier, *Experimental Techniques In Nuclear and Particle Physics*, 2010, IX, Hardcover, wyd. Springer, ISBN:978-3-642-00-828-2.
- [11] <http://article.sapub.org/10.5923.j.jnpp.20120203.04.html>
- [12] <http://experimentsscbb.ifj.edu.pl/>
- [13] H. Paganetti, *Nuclear interactions in proton therapy: dose and relative biological effect distributions originating from primary and secondary particles*, Phys Med Biol., 47(5):747-64, 7 marzec 2002.
- [14] <http://www.proton-therapy-today.com/where-to-get-pt/>
- [15] <http://www.ifj.edu.pl/ccb/budowa/>
- [16] *Physics Reference Manual* Version: geant4 9.4 , 17 grudzień 2010.
- [17] W. Scharf, *Akseleratory biomedyczne*, Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN, s. 284-289. ISBN 83-01-11308-1, 1994.
- [18] Monika Pieńkos, *Symulacja rzeczywistej wiązki protonów o energii 60 MeV w terapii nowotworów oka*, praca magisterska, Uniwersytet Śląski, Instytut Fizyki, 2008.
- [19] Tomasz Mostowski *Metoda Monte Carlo i jej zastosowania*, prezentacja, 2008.
coin.wne.uw.edu.pl/~tmostowski/pliki/matlab/matlab7.pdf
- [20] L. Widesott, A. Pierelli, C. Fiorino, A.J. Lomax, M. Amichetti, C. Cozzarini, M. Soukup, R. Schneider, E. Hug, N. Di Muzio, R. Calandrino, M. Schwarz, *Helical tomotherapy vs. intensity-modulated proton therapy for whole pelvis irradiation in high-risk prostate cancer patients: dosimetric, normal tissue complication probability, and generalized equivalent uniform dose analysis*, Radiation Oncology Biol. Phys., Vol. 80, No. 5, pp. 1589–1600, 2011.
- [21] <http://www.ptcri.ox.ac.uk/about/literaturereview.shtml>
- [22] A. Konefał, *Symulacje metodą Monte Carlo za pomocą oprogramowania GE-ANT4*, Postępy Fizyki, Tom 57, zeszyt 6, 2006.

- [23] *Prescribing, recording, and reporting proton-beam therapy*, Journal of the ICRU Volume 7 No 2, ISBN 9780199543489, Oxford University Press, 2007.
- [24] <http://www.proton-therapy-today.com/where-to-get-pt/>
- [25] *Radioterapia protonowa nowotworów oka*, broszura dla pacjenta Kliniki Okulistyki i Onkologii Okulistycznej Szpitala Uniwersyteckiego w Krakowie.
- [26] <http://www.ifj.edu.pl/ccb/radioterapia/stanowisko.php>
- [27] M. Nowina-Konopka, *Terapia hadronowa w Krakowie*, FOTON 123, str 16-22, Zima 2013.
- [28] P. Olko, *Wiązka skanująca w radioterapii protonowej - wyzwanie dla fizyków*, Zjazd Fizyków Polskich, Kielce 2015 (wystąpienie).
- [29] <http://geant4.web.cern.ch/geant4/>
- [30] G. A. P. Cirrone, G. Cuttone, S. E. Mazzaglia, F. Romano, D. Sardina, C. Agodi, A. Attili, A. A. Blacnato, M. De Napoli, F. Di Rosa, P. Kaitaniemi, F. Marchetto, I. Petrocic, A. Ristic-Fira, J. Shin, N. Tarnavsky, S. Tropea, Ch. Zacharatou, *Hadrontherapy: a Geant4-Based Tool for Proton/Ion-Therapy Studies*, Progress in NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 2, pp.207-212, 2011.
- [31] G. A. P. Cirrone et al., *62 AMeV proton beam for the treatment of ocular melanoma at Laboratori Nazionali del Sud*, IEEE Trans. Nucl. Sci., 51[3], 860-865, 2004.
- [32] G.A.P. Cirrone. *Hadrontherapy GEANT4 application: How Monte Carlo Helps Hadrontherapy*, 13th UK Monte Carlo User Group Meeting 28-29, marzec 2007.
- [33] T. Aso, S. Kameoka, K. Murakami, T. Sasaki, A. Kumura, T. Akagi, T. Nishio, I. Daftari, T. Yamashita *A GEANT4 based simulation for proton therapy*, Computing in High Energy Physics 2007 in Victoria, 2 września 2007.
- [34] L. Grevillot, T. Frisson, N. Zahra, D. Bertrand, F. Stichelbaut, N. Freud, D. Sarrut *Optimization of GEANT4 settings for Proton Pencil Beam Scanning simulations using GATE*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research

- [35] <http://www.ifj.edu.pl/ccb/radioterapia/>
- [36] http://www.portalwiedzy.pan.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=244:cyklotron-aic-144-instytut-fizyki-jdrowej-pan-w-krakowie&catid=61:prace-badawcze-wyniki-zastos&Itemid=81
- [37] <http://www.ifj.edu.pl/publ/reports/2005/1975.pdf?lang=pl>
- [38] http://www.nuph.us.edu.pl/~skowalsk/local_user/wyklady/wzfj/wyklad2.pdf
- [39] *Ionizing radiation detectors*, PTW, 2008-2009.
- [40] N. Soppera, E. Dupont, M. Bossant, *JANIS Book of proton-induced cross-sections Comparison of evaluated and experimental data from ENDF/B-VII.1, JENDL/HE-2007, PADF-2007, TENDL-2011 and EXFOR*, OECD NEA Data Bank, 2012.
- [41] J. Wittyh, P. Kukołowicz, *Wpływ płyty rozpraszającej na rozkład dawki od wiązki promieniowania X o energii 6 MeV*, Rep. Pract. Oncol. Radiother. 8 (1) 2003.
- [42] M. Grządziel, A. Konefał, W. Zipper, R. Pietrzak, E. Bzymek *Verification of the use of GEANT4 and MCNPX Monte Carlo Codes for Calculations of the Depth-Dose Distributions in Water for the Proton Therapy of Eye Tumours*, Nukleonika, Volume 59, Issue 2, Pages 61–66, ISSN (Online) 0029-5922, DOI: 10.2478/nuka-2014-0007, July 2014.

UNIwersytet Śląski
Wydział Matematyki, Fizyki i Chemii
Instytut Fizyki
Zakład Fizyki Jądrowej i Jej Zastosowań

Małgorzata Grządziel

Załącznik do pracy doktorskiej

Wyznaczanie przestrzennego rozkładu dawki w terapii
protonowej oka z wykorzystaniem pakietu GEANT4.

Katowice 2015

Spis treści

1	Dane pomiarowe	4
1.1	Rozkład dawki na głębokości	4
1.2	Profil poprzeczny wiązki.	19
1.3	Rozkład dawki na głębokości interpolowany na podstawie danych pomiarowych.	23
1.4	Profil wiązki interpolowany na podstawie danych pomiarowych-wstawić albo nie wstawić-oto jest pytanie.	29
1.5	Poszerzony pik Bragga	29
2	Symulacje głębokościowego rozkładu dawki	34
2.1	Symulacje wiązek monoenergetycznych o energiach 57 MeV, 58 MeV, 59 MeV, 60 MeV i 61 MeV.	34
2.2	Symulacje wiązek o energetycznym rozkładzie Gaussa	45
2.2.1	Wiązki o energii średniej 60 MeV i rozmyciach energetycznych 0,2 MeV, 0,4 MeV, 0,6 MeV, 0,8 MeV i 1,0 MeV.	45
2.2.2	Wiązki o energii średniej 60,2 MeV i rozmyciach energetycznych 0,2 MeV i 0,4 MeV.	56
2.3	Symulacje wiązek o energetycznym rozkładzie Gaussa zmodyfikowanym poprzez wstawienie instrukcji warunkowej określającej maksymalną energię wiązki.	68
2.4	Rozkład energetyczny zadany histogramem	79
2.5	Wiązka równoległa i wiązka rozbieżna	89

2.6	Wpływ elementów stanowiska terapeutycznego na rozkłady dawki na głębokości.	99
2.7	Symulacje rozkładu dawki na głębokości z uwzględnieniem reakcji jądrowych i bez.	111
3	Symulacje profilu poprzecznego wiązki	122
3.1	Wpływ elementów stanowiska terapii protonowej na profil wiązki. . .	122
3.2	Profil wiązki uwzględniający wszystkie najważniejsze elementy geometryczne stanowiska terapii protonowej, w tym kolimator.	126
4	Symulacje poszerzonego piku Bragga	129
4.1	Symulacje uproszczonego modulatora energii	129
4.1.1	Wiązka protonów o energii 50 MeV	129
4.1.2	Wiązka protonów o energii 55 MeV	139
4.1.3	Wiązka protonów o energii 60 MeV	148
4.1.4	Wiązka protonów o energii 65 MeV	160
4.1.5	Wiązka protonów o energii 70 MeV	175
4.1.6	Obrót koła modulacyjnego.	191
4.2	Symulacje rzeczywistego modulatora energii.	206
4.2.1	Rozkłady dawki na głębokości dla wiązek protonów, które przeszły przez różne grubości absorbenta PMMA	206
4.2.2	Symulacje poszerzonego piku Bragga.	223
	Spis tabel	235

Rozdział 1

Dane pomiarowe

1.1 Rozkład dawki na głębokości

Tabela 1.1: Rozkład dawki na głębokości zmierzony na stanowisku terapii protonowej IFJ PAN w Krakowie.

Głębokość [mm]	Dawka względna	Głębokość [mm]	Dawka względna
1,9462	0,2030	27,7858	0,8915
2,0462	0,2044	27,7858	0,8966
2,1458	0,2044	27,7858	0,9008
2,2460	0,2048	27,7960	0,9028
2,3462	0,2046	27,7960	0,9081
2,4462	0,2056	27,7960	0,9087
2,5458	0,2052	27,8060	0,9133
2,6460	0,2060	27,8060	0,9135
2,7462	0,2063	27,8060	0,9139
2,8462	0,2065	27,8160	0,9214
2,9458	0,2067	27,8160	0,9181
3,0460	0,2069	27,8160	0,9167
3,1462	0,2073	27,8260	0,9226

3,2462	0,2075	27,8260	0,9222
3,3458	0,2079	27,8260	0,9220
3,4460	0,2081	27,8362	0,9232
3,5462	0,2095	27,8362	0,9254
3,6462	0,2089	27,8362	0,9262
3,7458	0,2093	27,8460	0,9306
3,8460	0,2093	27,8460	0,9290
3,9462	0,2097	27,8460	0,9304
4,0462	0,2097	27,8560	0,9319
4,1458	0,2101	27,8560	0,9341
4,2460	0,2099	27,8560	0,9337
4,3462	0,2115	27,8660	0,9359
4,4462	0,2115	27,8660	0,9401
4,5458	0,2115	27,8660	0,9377
4,6460	0,2115	27,8760	0,9427
4,7462	0,2123	27,8760	0,9425
4,8462	0,2123	27,8760	0,9425
4,9458	0,2113	27,8860	0,9460
5,0460	0,2129	27,8860	0,9474
5,1462	0,2129	27,8860	0,9460
5,2462	0,2137	27,8958	0,9500
5,3458	0,2131	27,8958	0,9496
5,4460	0,2135	27,8958	0,9500
5,5462	0,2147	27,9060	0,9534
5,6462	0,2149	27,9060	0,9532
5,7458	0,2147	27,9060	0,9530
5,8460	0,2153	27,9158	0,9571
5,9462	0,2155	27,9158	0,9585
6,0462	0,2163	27,9158	0,9569
6,1458	0,2171	27,9262	0,9593

6,2460	0,2167	27,9262	0,9597
6,3462	0,2173	27,9262	0,9599
6,4462	0,2171	27,9362	0,9633
6,5458	0,2175	27,9362	0,9637
6,6460	0,2185	27,9362	0,9639
6,7462	0,2188	27,9462	0,9673
6,8462	0,2188	27,9462	0,9661
6,9458	0,2196	27,9462	0,9663
7,0460	0,2196	27,9562	0,9718
7,1462	0,2204	27,9562	0,9706
7,2462	0,2202	27,9562	0,9722
7,3458	0,2214	27,9662	0,9714
7,4460	0,2214	27,9662	0,9734
7,5462	0,2222	27,9662	0,9730
7,6462	0,2220	27,9762	0,9742
7,7458	0,2218	27,9762	0,9744
7,8460	0,2232	27,9762	0,9758
7,9462	0,2232	27,9858	0,9780
8,0462	0,2238	27,9858	0,9752
8,1458	0,2242	27,9858	0,9754
8,2460	0,2248	27,9958	0,9770
8,3462	0,2244	27,9958	0,9815
8,4462	0,2248	27,9958	0,9831
8,5458	0,2252	28,0058	0,9857
8,6460	0,2260	28,0056	0,9861
8,7462	0,2264	28,0056	0,9861
8,8462	0,2268	28,0162	0,9875
8,9458	0,2250	28,0162	0,9861
9,0460	0,2270	28,0162	0,9873
9,1462	0,2272	28,0262	0,9897

9,2462	0,2276	28,0262	0,9881
9,3458	0,2284	28,0262	0,9907
9,4460	0,2286	28,0362	0,9913
9,5462	0,2292	28,0362	0,9885
9,6462	0,2300	28,0362	0,9853
9,7458	0,2298	28,0462	0,9869
9,8460	0,2310	28,0460	0,9881
9,9462	0,2317	28,0460	0,9925
10,0462	0,2319	28,0562	0,9956
10,1458	0,2321	28,0562	0,9954
10,2460	0,2327	28,0562	0,9946
10,3462	0,2313	28,0662	0,9948
10,4462	0,2323	28,0662	0,9942
10,5458	0,2339	28,0662	0,9905
10,6460	0,2351	28,0762	0,9911
10,7462	0,2347	28,0762	0,9899
10,8462	0,2357	28,0762	0,9935
10,9458	0,2351	28,0862	0,9917
11,0460	0,2365	28,0862	0,9935
11,1462	0,2369	28,0862	0,9919
11,2462	0,2371	28,0960	0,9942
11,3458	0,2385	28,0960	0,9962
11,4460	0,2381	28,0960	0,9944
11,5462	0,2389	28,1058	0,9974
11,6462	0,2395	28,1058	0,9994
11,7458	0,2401	28,1058	1,0000
11,8460	0,2401	28,1158	0,9966
11,9462	0,2407	28,1158	0,9958
12,0462	0,2417	28,1158	0,9938
12,1458	0,2419	28,1258	0,9946

12,2460	0,2423	28,1258	0,9948
12,3462	0,2427	28,1258	0,9960
12,4462	0,2435	28,1358	0,9921
12,5458	0,2438	28,1358	0,9931
12,6460	0,2442	28,1358	0,9935
12,7462	0,2450	28,1462	0,9927
12,8462	0,2460	28,1462	0,9913
12,9458	0,2462	28,1462	0,9923
13,0460	0,2468	28,1562	0,9889
13,1462	0,2472	28,1562	0,9879
13,2462	0,2478	28,1562	0,9905
13,3458	0,2486	28,1662	0,9901
13,4460	0,2488	28,1662	0,9879
13,5462	0,2496	28,1662	0,9909
13,6462	0,2504	28,1760	0,9897
13,7458	0,2508	28,1760	0,9875
13,8460	0,2514	28,1760	0,9867
13,9462	0,2518	28,1858	0,9869
14,0462	0,2524	28,1858	0,9863
14,1458	0,2530	28,1858	0,9845
14,2460	0,2544	28,1960	0,9865
14,3462	0,2548	28,1960	0,9883
14,4462	0,2554	28,1960	0,9901
14,5458	0,2560	28,2060	0,9867
14,6460	0,2563	28,2060	0,9867
14,7462	0,2571	28,2060	0,9877
14,8462	0,2579	28,2160	0,9841
14,9458	0,2587	28,2160	0,9837
15,0460	0,2591	28,2160	0,9841
15,1462	0,2601	28,2260	0,9679

15,2462	0,2609	28,2260	0,9831
15,3458	0,2617	28,2260	0,9825
15,4460	0,2621	28,2362	0,9768
15,5462	0,2637	28,2362	0,9780
15,6462	0,2641	28,2362	0,9766
15,7458	0,2647	28,2460	0,9704
15,8460	0,2655	28,2460	0,9710
15,9462	0,2665	28,2460	0,9736
16,0462	0,2673	28,2560	0,9685
16,1458	0,2679	28,2560	0,9669
16,2460	0,2685	28,2560	0,9685
16,3462	0,2702	28,2660	0,9629
16,4462	0,2706	28,2660	0,9613
16,5458	0,2714	28,2660	0,9625
16,6460	0,2730	28,2760	0,9573
16,7462	0,2734	28,2760	0,9571
16,8462	0,2742	28,2760	0,9569
16,9458	0,2748	28,2860	0,9538
17,0460	0,2758	28,2860	0,9522
17,1462	0,2772	28,2860	0,9534
17,2462	0,2780	28,2960	0,9460
17,3458	0,2786	28,2960	0,9454
17,4460	0,2798	28,2960	0,9419
17,5462	0,2806	28,3058	0,9313
17,6462	0,2815	28,3058	0,9367
17,7458	0,2827	28,3058	0,9375
17,8460	0,2825	28,3160	0,9306
17,9462	0,2813	28,3160	0,9284
18,0462	0,2843	28,3160	0,9298
18,1458	0,2883	28,3262	0,9198

18,2460	0,2873	28,3262	0,9171
18,3462	0,2887	28,3262	0,9169
18,4462	0,2901	28,3362	0,9105
18,5458	0,2913	28,3362	0,9091
18,6460	0,2917	28,3362	0,9133
18,7462	0,2929	28,3462	0,9067
18,8462	0,2933	28,3462	0,9083
18,9458	0,2962	28,3462	0,9071
19,0460	0,2978	28,3562	0,9000
19,1462	0,3014	28,3562	0,8956
19,2462	0,2990	28,3562	0,8996
19,3458	0,3014	28,3662	0,8919
19,4460	0,3034	28,3662	0,8946
19,5462	0,3042	28,3662	0,8950
19,6462	0,3048	28,3762	0,8869
19,7458	0,3073	28,3762	0,8871
19,8460	0,3060	28,3762	0,8865
19,9462	0,3085	28,3858	0,8744
20,0462	0,3101	28,3858	0,8744
20,1458	0,3123	28,3858	0,8758
20,2460	0,3125	28,3958	0,8688
20,3462	0,3149	28,3958	0,8710
20,4462	0,3167	28,3958	0,8679
20,5458	0,3181	28,4058	0,8593
20,6460	0,3206	28,4056	0,8556
20,7462	0,3214	28,4056	0,8567
20,8462	0,3244	28,4162	0,8464
20,9458	0,3250	28,4162	0,8476
21,0460	0,3214	28,4162	0,8454
21,1462	0,3276	28,4262	0,8405

21,2462	0,3310	28,4262	0,8369
21,3458	0,3331	28,4260	0,8381
21,4460	0,3288	28,4362	0,8282
21,5462	0,3355	28,4362	0,8256
21,6462	0,3393	28,4362	0,8284
21,7458	0,3409	28,4462	0,8169
21,8460	0,3435	28,4460	0,8151
21,9462	0,3454	28,4460	0,8157
22,0462	0,3480	28,4562	0,8042
22,1458	0,3506	28,4562	0,8046
22,2460	0,3526	28,4562	0,8020
22,3462	0,3544	28,4662	0,7923
22,4462	0,3579	28,4660	0,7887
22,5458	0,3595	28,4660	0,7893
22,6460	0,3619	28,4762	0,7798
22,7462	0,3655	28,4762	0,7794
22,8462	0,3681	28,4762	0,7768
22,9458	0,3712	28,4862	0,7679
23,0460	0,3726	28,4862	0,7645
23,1462	0,3756	28,4862	0,7665
23,2462	0,3772	28,4960	0,7552
23,3458	0,3865	28,4960	0,7544
23,4460	0,3847	28,4960	0,7530
23,5462	0,3887	28,5058	0,7347
23,6462	0,3927	28,5058	0,7353
23,7458	0,3944	28,5058	0,7343
23,8460	0,3976	28,5158	0,7232
23,9462	0,4004	28,5158	0,7347
24,0462	0,4058	28,5158	0,7226
24,1458	0,4101	28,5258	0,7056

24,2460	0,4137	28,5258	0,7075
24,3462	0,4179	28,5258	0,7075
24,4462	0,4230	28,5358	0,6938
24,5458	0,4280	28,5358	0,6938
24,6460	0,4169	28,5358	0,6935
24,7462	0,4397	28,5462	0,6829
24,8462	0,4393	28,5462	0,6808
24,9458	0,4466	28,5462	0,6810
25,0460	0,4506	28,5562	0,6677
25,1462	0,4591	28,5562	0,6669
25,2462	0,4671	28,5562	0,6681
25,3458	0,4744	28,5662	0,6571
25,4460	0,4806	28,5662	0,6546
25,5462	0,4853	28,5662	0,6530
25,6462	0,4865	28,5760	0,6387
25,7458	0,5016	28,5760	0,6385
25,8460	0,4998	28,5760	0,6450
25,9462	0,5163	28,5858	0,6329
26,0462	0,5302	28,5858	0,6323
26,1458	0,5363	28,5858	0,6308
26,1958	0,5409	28,5960	0,6188
26,2460	0,5482	28,5960	0,6188
26,2960	0,5536	28,5960	0,6161
26,3462	0,5571	28,6060	0,6054
26,3958	0,5661	28,6060	0,6050
26,4462	0,5722	28,6060	0,6038
26,4960	0,5802	28,6160	0,5925
26,5462	0,5883	28,6160	0,5907
26,5958	0,5887	28,6160	0,5901
26,6460	0,5992	28,6260	0,5776

26,6960	0,6091	28,6260	0,5778
26,7462	0,6185	28,6260	0,5760
26,7958	0,6222	28,6362	0,5643
26,8462	0,6268	28,6362	0,5665
26,8960	0,6411	28,6362	0,5631
26,9462	0,6476	28,6460	0,5514
26,9958	0,6605	28,6460	0,5520
27,0460	0,6696	28,6460	0,5571
27,0960	0,6819	28,6562	0,5363
27,1462	0,6942	28,6562	0,5373
27,1958	0,7069	28,6562	0,5359
27,1958	0,7067	28,6660	0,5236
27,1958	0,7083	28,6660	0,5212
27,1958	0,7071	28,6660	0,5212
27,2058	0,7103	28,6760	0,5091
27,2056	0,7099	28,6760	0,5083
27,2056	0,7099	28,6760	0,5056
27,2162	0,7131	28,6860	0,4976
27,2162	0,7119	28,6860	0,4956
27,2162	0,7071	28,6860	0,4933
27,2262	0,7081	28,6960	0,4808
27,2262	0,7099	28,6960	0,4829
27,2262	0,7113	28,6960	0,4810
27,2362	0,7153	28,7058	0,4685
27,2362	0,7165	28,7058	0,4681
27,2362	0,7153	28,7058	0,4698
27,2462	0,7171	28,7160	0,4556
27,2460	0,7151	28,7160	0,4548
27,2460	0,7173	28,7160	0,4552
27,2562	0,7202	28,7262	0,4407

27,2562	0,7194	28,7262	0,4411
27,2562	0,7200	28,7262	0,4405
27,2662	0,7208	28,7362	0,4280
27,2662	0,7222	28,7362	0,4266
27,2662	0,7216	28,7362	0,4272
27,2762	0,7246	28,7462	0,4131
27,2762	0,7230	28,7462	0,4143
27,2762	0,7254	28,7462	0,4157
27,2862	0,7272	28,7562	0,4054
27,2862	0,7254	28,7562	0,4046
27,2862	0,7260	28,7562	0,4036
27,2960	0,7280	28,7662	0,3933
27,2960	0,7254	28,7662	0,3917
27,2960	0,7298	28,7662	0,3885
27,3058	0,7302	28,7762	0,3726
27,3058	0,7353	28,7762	0,3730
27,3058	0,7353	28,7762	0,3714
27,3158	0,7369	28,7858	0,3681
27,3158	0,7405	28,7858	0,3675
27,3158	0,7359	28,7858	0,3677
27,3258	0,7407	28,7958	0,3560
27,3258	0,7407	28,7958	0,3546
27,3258	0,7411	28,7958	0,3526
27,3358	0,7440	28,8058	0,3427
27,3358	0,7431	28,8056	0,3438
27,3358	0,7450	28,8056	0,3444
27,3462	0,7466	28,8162	0,3325
27,3462	0,7456	28,8162	0,3317
27,3462	0,7452	28,8162	0,3327
27,3562	0,7458	28,8262	0,3228

27,3562	0,7478	28,8262	0,3210
27,3562	0,7486	28,8260	0,3157
27,3662	0,7512	28,8362	0,3046
27,3662	0,7520	28,8362	0,3034
27,3662	0,7524	28,8362	0,3050
27,3760	0,7560	28,8462	0,2933
27,3760	0,7554	28,8460	0,2931
27,3760	0,7548	28,8460	0,2915
27,3858	0,7587	28,8562	0,2867
27,3858	0,7579	28,8562	0,2879
27,3858	0,7597	28,8562	0,2873
27,3960	0,7619	28,8662	0,2772
27,3960	0,7617	28,8660	0,2724
27,3960	0,7617	28,8660	0,2750
27,4060	0,7657	28,8762	0,2677
27,4060	0,7655	28,8762	0,2663
27,4060	0,7663	28,8762	0,2657
27,4160	0,7681	28,8862	0,2563
27,4160	0,7688	28,8862	0,2571
27,4160	0,7688	28,8862	0,2563
27,4260	0,7706	28,8960	0,2474
27,4260	0,7704	28,8960	0,2472
27,4260	0,7708	28,8960	0,2458
27,4362	0,7683	28,9058	0,2357
27,4362	0,7736	28,9058	0,2327
27,4362	0,7746	28,9058	0,2345
27,4460	0,7784	28,9158	0,2258
27,4460	0,7784	28,9158	0,2206
27,4460	0,7794	28,9158	0,2232
27,4560	0,7806	28,9258	0,2169

27,4560	0,7790	28,9258	0,2163
27,4560	0,7810	28,9258	0,2143
27,4660	0,7843	28,9358	0,2069
27,4660	0,7867	28,9358	0,2050
27,4660	0,7845	28,9358	0,2069
27,4760	0,7903	28,9462	0,1978
27,4760	0,7889	28,9462	0,1974
27,4760	0,7889	28,9462	0,1968
27,4860	0,7925	28,9562	0,1879
27,4860	0,7925	28,9562	0,1875
27,4860	0,7925	28,9562	0,1893
27,4960	0,7867	28,9662	0,1806
27,4960	0,7911	28,9662	0,1808
27,4960	0,7891	28,9662	0,1798
27,5058	0,7942	28,9760	0,1728
27,5058	0,7958	28,9760	0,1716
27,5058	0,7996	28,9760	0,1718
27,5160	0,8042	28,9858	0,1631
27,5160	0,7996	28,9858	0,1633
27,5160	0,7954	28,9858	0,1615
27,5262	0,7972	28,9960	0,1542
27,5262	0,8056	28,9960	0,1556
27,5262	0,8067	28,9960	0,1552
27,5362	0,8107	29,0060	0,1500
27,5362	0,8093	29,0060	0,1470
27,5362	0,8119	29,0060	0,1476
27,5462	0,8141	29,0160	0,1399
27,5462	0,8137	29,0160	0,1425
27,5462	0,8139	29,0160	0,1391
27,5562	0,8048	29,0260	0,1333

27,5562	0,8111	29,0260	0,1345
27,5562	0,8071	29,0260	0,1325
27,5662	0,8097	29,0362	0,1258
27,5662	0,8129	29,0362	0,1258
27,5662	0,8181	29,0362	0,1268
27,5762	0,8204	29,0460	0,1202
27,5762	0,8125	29,0460	0,1202
27,5762	0,8143	29,0460	0,1192
27,5858	0,8212	29,0562	0,1119
27,5858	0,8200	29,0562	0,1139
27,5858	0,8246	29,0562	0,1147
27,5958	0,8280	29,0660	0,1091
27,5958	0,8252	29,0660	0,1093
27,5958	0,8232	29,0660	0,1113
27,6058	0,8292	29,0760	0,1022
27,6056	0,8313	29,0760	0,1010
27,6056	0,8343	29,0760	0,1036
27,6162	0,8391	29,0860	0,0942
27,6162	0,8417	29,0860	0,0942
27,6162	0,8413	29,0860	0,0944
27,6262	0,8472	29,0960	0,0899
27,6262	0,8466	29,0960	0,0901
27,6262	0,8454	29,0960	0,0903
27,6362	0,8488	29,1058	0,0863
27,6362	0,8494	29,1058	0,0859
27,6362	0,8484	29,1058	0,0845
27,6462	0,8520	29,1160	0,0800
27,6460	0,8528	29,1160	0,0808
27,6460	0,8550	29,1160	0,0806
27,6562	0,8560	29,1262	0,0764

27,6562	0,8573	29,1262	0,0756
27,6562	0,8558	29,1262	0,0762
27,6662	0,8603	29,1362	0,0724
27,6662	0,8611	29,1362	0,0730
27,6662	0,8609	29,1362	0,0728
27,6762	0,8631	29,1462	0,0665
27,6762	0,8653	29,1462	0,0663
27,6762	0,8651	29,1462	0,0665
27,6862	0,8673	29,1562	0,0627
27,6862	0,8685	29,1562	0,0627
27,6862	0,8688	29,1562	0,0625
27,6960	0,8712	29,1662	0,0607
27,6960	0,8722	29,1662	0,0593
27,6960	0,8728	29,1662	0,0595
27,7058	0,8673	29,1762	0,0558
27,7058	0,8639	29,1762	0,0595
27,7058	0,8647	29,1762	0,0597
27,7158	0,8772	29,1858	0,0567
27,7158	0,8802	29,1858	0,0554
27,7158	0,8796	29,1858	0,0542
27,7258	0,8821	29,1958	0,0502
27,7258	0,8839	29,1958	0,0494
27,7258	0,8817	29,1958	0,0494
27,7358	0,8857	29,1958	0,0496
27,7358	0,8857	29,2460	0,0361
27,7358	0,8863	29,2958	0,0248
27,7462	0,8903	29,3462	0,0171
27,7462	0,8903	29,3958	0,0111
27,7462	0,8903	29,4460	0,0067
27,7562	0,8929	29,4960	0,0036

27,7562	0,8952	29,5462	0,0016
27,7562	0,8944	29,5958	0,0004
27,7662	0,8984	29,6460	0,0000
27,7662	0,8911	29,6958	0,0000
27,7662	0,8921	29,7462	0,0000
27,7760	0,8841	29,7958	0,0000
27,7760	0,8966	29,8460	0,0000
27,7760	0,8875	29,8960	0,0000
27,7858	0,8915	29,9462	0,0000
27,7858	0,8966	29,9958	0,0000
27,7858	0,9008	30,0460	0,0000
27,7960	0,9028	30,0958	0,0000
27,7960	0,9081	30,1462	0,0000
27,7960	0,9087	30,1958	0,0000

1.2 Profil poprzeczny wiązki.

Tabela 1.2: Profil poprzeczny wiązki zmierzony na stanowisku terapii protonowej IFJ PAN w Krakowie.

x [mm]	Dawka względna	x [mm]	Dawka względna
-30,2	0	1,3	0,98
-29,2	0	1,8	0,97
-28,2	0	2,3	0,98
-27,2	0	2,8	0,97
-26,2	0	3,3	0,99
-25,2	0	3,8	1
-24,2	0	4,3	1
-23,2	0	4,8	0,98

-22,2	0,01	5,3	0,99
-22,1	0,01	5,8	0,98
-22	0,01	6,3	0,98
-21,9	0,01	6,8	0,98
-21,8	0,01	7,3	0,98
-21,7	0,01	7,8	0,98
-21,6	0,01	8,3	0,98
-21,5	0,01	8,8	0,98
-21,4	0,02	9,3	0,97
-21,3	0,02	9,8	0,97
-21,2	0,03	10,3	0,95
-21,1	0,04	10,8	0,96
-21	0,05	11,3	0,96
-20,9	0,07	11,8	0,96
-20,8	0,09	12,3	0,95
-20,7	0,13	12,8	0,95
-20,6	0,18	13,3	0,94
-20,5	0,24	13,8	0,93
-20,4	0,29	14,3	0,92
-20,3	0,36	14,8	0,91
-20,2	0,42	14,9	0,91
-20,1	0,5	15	0,91
-20	0,56	15,1	0,92
-19,9	0,64	15,2	0,91
-19,8	0,67	15,3	0,91
-19,7	0,72	15,4	0,91
-19,6	0,76	15,5	0,91
-19,5	0,78	15,6	0,9
-19,4	0,81	15,7	0,91
-19,3	0,82	15,8	0,91

-19,2	0,83	15,9	0,9
-19,1	0,85	16	0,9
-19	0,87	16,1	0,89
-18,9	0,87	16,2	0,9
-18,8	0,88	16,3	0,9
-18,7	0,88	16,4	0,89
-18,6	0,88	16,5	0,89
-18,5	0,89	16,6	0,89
-18,4	0,89	16,7	0,87
-18,3	0,89	16,8	0,89
-18,2	0,89	16,9	0,88
-18,1	0,9	17	0,89
-18	0,9	17,1	0,88
-17,9	0,9	17,2	0,88
-17,8	0,9	17,3	0,89
-17,7	0,9	17,4	0,88
-17,6	0,9	17,5	0,87
-17,5	0,9	17,6	0,87
-17,4	0,91	17,7	0,87
-17,3	0,9	17,8	0,88
-17,2	0,91	17,9	0,86
-17,1	0,91	18	0,87
-17	0,9	18,1	0,85
-16,9	0,91	18,2	0,85
-16,8	0,91	18,3	0,85
-16,7	0,91	18,4	0,84
-16,6	0,9	18,5	0,84
-16,5	0,92	18,6	0,84
-16,4	0,93	18,7	0,83
-16,3	0,91	18,8	0,82

-16,2	0,93	18,9	0,81
-16,1	0,93	19	0,8
-16	0,93	19,1	0,79
-15,9	0,91	19,2	0,76
-15,8	0,91	19,3	0,74
-15,7	0,92	19,4	0,72
-15,6	0,92	19,5	0,69
-15,5	0,92	19,6	0,66
-15,4	0,92	19,7	0,61
-15,3	0,92	19,8	0,55
-15,2	0,92	19,9	0,51
-14,7	0,92	20	0,43
-14,2	0,94	20,1	0,37
-13,7	0,93	20,2	0,31
-13,2	0,95	20,3	0,25
-12,7	0,96	20,4	0,19
-12,2	0,96	20,5	0,14
-11,7	0,96	20,6	0,11
-11,2	0,97	20,7	0,07
-10,7	0,96	20,8	0,05
-10,2	0,97	20,9	0,04
-9,7	0,98	21	0,03
-9,2	0,98	21,1	0,02
-8,7	0,98	21,2	0,02
-8,2	0,98	21,3	0,02
-7,7	0,99	21,4	0,01
-7,2	0,99	21,5	0,01
-6,7	0,99	21,6	0,01
-6,2	1	21,7	0,01
-5,7	0,99	21,8	0,01

-5,2	1	22,3	0,01
-4,7	0,99	22,8	0,01
-4,2	0,99	23,8	0,01
-3,7	0,99	24,8	0,01
-3,2	0,99	25,8	0
-2,7	0,98	26,8	0
-2,2	0,98	27,8	0
-1,7	0,98	28,8	0
-1,2	0,98	29,8	0
-0,7	0,98	30,8	0
-0,2	0,98	31,8	0
0,3	0,98	32,8	0
0,8	0,99		

1.3 Rozkład dawki na głębokości interpolowany na podstawie danych pomiarowych.

Tabela 1.3: Rozkład dawki na głębokości interpolowany na podstawie danych pomiarowych.

głębokość [mm]	Dawka względna	głębokość [mm]	Dawka względna
0,1	0,20	15,3	0,26
0,2	0,20	15,4	0,26
0,3	0,20	15,5	0,26
0,4	0,20	15,6	0,26
0,5	0,20	15,7	0,27
0,6	0,20	15,8	0,27
0,7	0,20	15,9	0,27
0,8	0,20	16	0,27

0,9	0,20	16,1	0,27
1	0,20	16,2	0,27
1,1	0,20	16,3	0,27
1,2	0,20	16,4	0,27
1,3	0,20	16,5	0,27
1,4	0,20	16,6	0,27
1,5	0,20	16,7	0,27
1,6	0,20	16,8	0,27
1,7	0,20	16,9	0,27
1,8	0,20	17	0,27
1,9	0,20	17,1	0,28
2	0,20	17,2	0,28
2,1	0,20	17,3	0,28
2,2	0,20	17,4	0,28
2,3	0,20	17,5	0,28
2,4	0,20	17,6	0,28
2,5	0,20	17,7	0,28
2,6	0,20	17,8	0,28
2,7	0,20	17,9	0,28
2,8	0,20	18	0,29
2,9	0,21	18,1	0,29
3	0,21	18,2	0,29
3,1	0,21	18,3	0,29
3,2	0,21	18,4	0,29
3,3	0,21	18,5	0,29
3,4	0,21	18,6	0,29
3,5	0,21	18,7	0,29
3,6	0,21	18,8	0,30
3,7	0,21	18,9	0,30
3,8	0,21	19	0,30

3,9	0,21	19,1	0,30
4	0,21	19,2	0,30
4,1	0,21	19,3	0,30
4,2	0,21	19,4	0,30
4,3	0,21	19,5	0,30
4,4	0,21	19,6	0,31
4,5	0,21	19,7	0,31
4,6	0,21	19,8	0,31
4,7	0,21	19,9	0,31
4,8	0,21	20	0,31
4,9	0,21	20,1	0,31
5	0,21	20,2	0,31
5,1	0,21	20,3	0,31
5,2	0,21	20,4	0,32
5,3	0,21	20,5	0,32
5,4	0,21	20,6	0,32
5,5	0,21	20,7	0,32
5,6	0,21	20,8	0,32
5,7	0,21	20,9	0,32
5,8	0,22	21	0,32
5,9	0,22	21,1	0,33
6	0,22	21,2	0,33
6,1	0,22	21,3	0,33
6,2	0,22	21,4	0,33
6,3	0,22	21,5	0,33
6,4	0,22	21,6	0,34
6,5	0,22	21,7	0,34
6,6	0,22	21,8	0,34
6,7	0,22	21,9	0,34
6,8	0,22	22	0,35

6,9	0,22	22,1	0,35
7	0,22	22,2	0,35
7,1	0,22	22,3	0,35
7,2	0,22	22,4	0,36
7,3	0,22	22,5	0,36
7,4	0,22	22,6	0,36
7,5	0,22	22,7	0,36
7,6	0,22	22,8	0,37
7,7	0,22	22,9	0,37
7,8	0,22	23	0,37
7,9	0,22	23,1	0,38
8	0,22	23,2	0,38
8,1	0,22	23,3	0,38
8,2	0,22	23,4	0,39
8,3	0,23	23,5	0,39
8,4	0,23	23,6	0,39
8,5	0,23	23,7	0,40
8,6	0,23	23,8	0,40
8,7	0,23	23,9	0,40
8,8	0,23	24	0,41
8,9	0,23	24,1	0,41
9	0,23	24,2	0,41
9,1	0,23	24,3	0,42
9,2	0,23	24,4	0,42
9,3	0,23	24,5	0,43
9,4	0,23	24,6	0,43
9,5	0,23	24,7	0,43
9,6	0,23	24,8	0,44
9,7	0,23	24,9	0,44
9,8	0,23	25	0,45

9,9	0,23	25,1	0,46
10	0,23	25,2	0,46
10,1	0,24	25,3	0,47
10,2	0,24	25,4	0,48
10,3	0,24	25,5	0,48
10,4	0,24	25,6	0,49
10,5	0,23	25,7	0,50
10,6	0,23	25,8	0,50
10,7	0,23	25,9	0,51
10,8	0,23	26	0,51
10,9	0,24	26,1	0,52
11	0,24	26,2	0,54
11,1	0,24	26,3	0,55
11,2	0,24	26,4	0,57
11,3	0,24	26,5	0,58
11,4	0,24	26,6	0,59
11,5	0,24	26,7	0,61
11,6	0,24	26,8	0,62
11,7	0,24	26,9	0,64
11,8	0,24	27	0,66
11,9	0,24	27,1	0,67
12	0,24	27,2	0,71
12,1	0,24	27,3	0,74
12,2	0,24	27,4	0,77
12,3	0,24	27,5	0,80
12,4	0,24	27,6	0,83
12,5	0,24	27,7	0,86
12,6	0,24	27,8	0,90
12,7	0,25	27,9	0,96
12,8	0,25	28	0,99

12,9	0,25	28,1	1,00
13	0,25	28,2	0,98
13,1	0,25	28,3	0,94
13,2	0,25	28,4	0,87
13,3	0,25	28,5	0,74
13,4	0,25	28,6	0,61
13,5	0,25	28,7	0,48
13,6	0,25	28,8	0,36
13,7	0,25	28,9	0,24
13,8	0,25	29	0,15
13,9	0,25	29,1	0,09
14	0,25	29,2	0,05
14,1	0,25	29,3	0,04
14,2	0,25	29,4	0,01
14,3	0,26	29,5	0,00
14,4	0,26	29,6	0,00
14,5	0,26	29,7	0,00
14,6	0,26	29,8	0,00
14,7	0,26	29,9	0,00
14,8	0,26	30	0,00
14,9	0,26	30,1	0,00
15	0,26	30,2	0,00
15,1	0,26	30,3	0,00
15,2	0,26	30,4	0,00

1.4 Profil wiązki interpolowany na podstawie danych pomiarowych-wstawić albo nie wstawić-oto jest pytanie.

1.5 Poszerzony pik Bragga

Tabela 1.4: Zmierzony poszerzony pik Bragga.

Głębokość [mm]	Dawka względna	Głębokość [mm]	Dawka względna
1,85	0,68	15,85	1
1,95	0,69	15,95	1
2,15	0,69	16,05	1
2,25	0,69	16,15	1
2,35	0,69	16,25	1
2,45	0,69	16,35	1,01
2,55	0,69	16,45	1
2,65	0,69	16,55	1
2,75	0,69	16,65	1
2,85	0,7	16,75	1
2,95	0,7	16,85	1
3,05	0,7	16,95	1
3,15	0,7	17,05	1
3,25	0,7	17,25	1
3,35	0,7	17,35	1
3,45	0,7	17,45	1
3,55	0,71	17,55	1
3,65	0,71	17,65	1
3,75	0,71	17,75	1
3,85	0,71	17,85	1
3,95	0,71	17,95	1

4,05	0,71	18,05	1
4,15	0,71	18,15	1
4,25	0,71	18,25	1
4,35	0,72	18,35	1
4,45	0,72	18,45	1
4,55	0,72	18,55	1
4,65	0,73	18,65	1
4,75	0,72	18,75	1
4,85	0,72	18,85	1
4,95	0,73	18,95	1,01
5,05	0,73	19,05	1
5,15	0,73	19,15	1
5,25	0,73	19,25	1
5,35	0,73	19,35	1
5,45	0,73	19,45	1
5,55	0,74	19,55	0,99
5,65	0,74	19,65	1
5,75	0,74	19,75	1
5,85	0,74	19,85	1
5,95	0,74	19,95	1
6,05	0,74	20,05	1
6,15	0,74	20,15	1
6,25	0,74	20,25	1
6,35	0,75	20,35	1,01
6,45	0,75	20,45	1
6,55	0,75	20,55	1
6,65	0,75	20,65	1,01
6,75	0,75	20,75	1
6,85	0,75	20,85	1
6,95	0,76	20,95	1

7,05	0,76	21,05	1
7,15	0,76	21,15	1
7,25	0,76	21,25	1
7,35	0,76	21,35	1
7,45	0,77	21,45	1
7,55	0,77	21,55	1
7,65	0,77	21,65	1
7,75	0,77	21,75	1
7,85	0,77	21,85	1
7,95	0,78	21,95	1
8,05	0,78	22,05	1
8,15	0,78	22,15	1
8,25	0,78	22,25	1
8,35	0,78	22,35	1
8,45	0,79	22,45	1
8,55	0,79	22,55	1
8,65	0,79	22,65	1
8,75	0,79	22,75	1
8,85	0,8	22,85	1,01
8,95	0,8	22,95	1
9,05	0,8	23,05	1
9,15	0,81	23,15	1
9,25	0,81	23,25	1
9,35	0,81	23,35	1
9,45	0,81	23,45	1
9,55	0,81	23,55	1
9,65	0,81	23,65	1
9,75	0,82	23,75	1
9,85	0,82	23,85	1,01
9,95	0,82	23,95	1

10,05	0,83	24,05	1
10,15	0,83	24,15	1
10,25	0,83	24,25	1
10,35	0,84	24,35	1
10,45	0,84	24,45	1
10,55	0,84	24,55	1
10,65	0,85	24,65	1
10,75	0,85	24,75	1
10,85	0,85	24,85	1,01
10,95	0,86	24,95	1
11,05	0,86	25,05	1
11,15	0,86	25,15	1
11,25	0,87	25,25	1
11,35	0,87	25,35	1
11,45	0,88	25,45	1
11,55	0,88	25,55	1
11,65	0,88	25,65	1,01
11,75	0,89	25,75	1,01
11,85	0,89	25,85	1
11,95	0,9	25,95	1
12,05	0,91	26,05	1
12,15	0,91	26,15	1
12,25	0,92	26,25	1
12,35	0,92	26,35	1
12,45	0,93	26,45	1,01
12,55	0,94	26,55	0,99
12,65	0,94	26,65	1
12,75	0,95	26,75	1
12,85	0,96	26,85	0,99
12,95	0,97	26,95	0,99

13,05	0,98	27,05	0,99
13,15	0,99	27,15	0,99
13,25	1	27,25	0,99
13,35	1	27,35	1
13,45	1	27,45	1,01
13,55	1	27,55	1,01
13,65	1	27,65	1,01
13,75	1	27,75	1
13,85	1	27,85	1
13,95	1	27,95	1
14,05	1	28,05	0,99
14,15	1	28,15	0,98
14,25	1	28,25	0,98
14,35	1	28,35	0,94
14,45	1	28,45	0,86
14,55	1	28,55	0,77
14,65	1	28,65	0,67
14,75	1	28,75	0,56
14,85	1	28,85	0,41
14,95	1	28,95	0,29
15,05	1	29,05	0,2
15,15	1	29,15	0,12
15,25	1	29,25	0,07
15,35	1	29,35	0,03
15,45	1	29,45	0,01
15,55	1	29,55	0
15,65	1	29,65	0
15,75	1		

Rozdział 2

Symulacje głębokościowego rozkładu dawki

2.1 Symulacje wiązek monoenergetycznych o energiach 57 MeV, 58 MeV, 59 MeV, 60 MeV i 61 MeV.

Tabela 2.1: Rozkłady dawki na głębokości dla wiązek monoenergetycznych o energiach 57 MeV, 58 MeV, 59 MeV, 60 MeV i 61 MeV.

Głębokość [mm]	Dawka względna				
	57 MeV	58 MeV	59 MeV	60 MeV	61 MeV
0,1	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
0,2	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
0,3	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
0,4	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
0,5	0,16	0,16	0,16	0,18	0,16
0,6	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
0,7	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
0,8	0,16	0,17	0,16	0,16	0,16

0,9	0,16	0,17	0,16	0,16	0,17
1	0,16	0,17	0,16	0,16	0,16
1,1	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16
1,2	0,16	0,17	0,16	0,16	0,16
1,3	0,16	0,17	0,17	0,16	0,16
1,4	0,16	0,17	0,17	0,17	0,16
1,5	0,16	0,17	0,17	0,16	0,16
1,6	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16
1,7	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16
1,8	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16
1,9	0,17	0,17	0,17	0,16	0,17
2	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16
2,1	0,17	0,17	0,17	0,18	0,16
2,2	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
2,3	0,17	0,17	0,17	0,16	0,17
2,4	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
2,5	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
2,6	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
2,7	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
2,8	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
2,9	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
3	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
3,1	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
3,2	0,17	0,17	0,17	0,16	0,17
3,3	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
3,4	0,17	0,18	0,17	0,17	0,17
3,5	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
3,6	0,17	0,18	0,17	0,17	0,17
3,7	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
3,8	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17

3,9	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17
4	0,18	0,18	0,17	0,18	0,18
4,1	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17
4,2	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17
4,3	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17
4,4	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17
4,5	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17
4,6	0,18	0,18	0,18	0,20	0,18
4,7	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17
4,8	0,18	0,18	0,18	0,17	0,18
4,9	0,18	0,18	0,18	0,17	0,18
5	0,18	0,18	0,18	0,17	0,18
5,1	0,18	0,18	0,18	0,17	0,18
5,2	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17
5,3	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
5,4	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
5,5	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
5,6	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
5,7	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
5,8	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
5,9	0,18	0,18	0,18	0,17	0,18
6	0,18	0,18	0,18	0,17	0,18
6,1	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
6,2	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
6,3	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18
6,4	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
6,5	0,19	0,18	0,19	0,18	0,18
6,6	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18
6,7	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18
6,8	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18

6,9	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18
7	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18
7,1	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18
7,2	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18
7,3	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18
7,4	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18
7,5	0,19	0,19	0,19	0,18	0,19
7,6	0,19	0,19	0,19	0,18	0,19
7,7	0,19	0,19	0,19	0,18	0,19
7,8	0,19	0,19	0,19	0,18	0,19
7,9	0,19	0,20	0,19	0,19	0,19
8	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
8,1	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
8,2	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
8,3	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
8,4	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19
8,5	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19
8,6	0,19	0,20	0,19	0,19	0,19
8,7	0,19	0,20	0,19	0,19	0,19
8,8	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19
8,9	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19
9	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19
9,1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,19
9,2	0,20	0,20	0,20	0,19	0,20
9,3	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19
9,4	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19
9,5	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19
9,6	0,20	0,20	0,20	0,20	0,19
9,7	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19
9,8	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19

9,9	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19
10	0,20	0,20	0,20	0,19	0,20
10,1	0,20	0,20	0,20	0,19	0,20
10,2	0,20	0,20	0,21	0,19	0,20
10,3	0,21	0,20	0,20	0,19	0,19
10,4	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
10,5	0,20	0,21	0,20	0,19	0,20
10,6	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20
10,7	0,20	0,21	0,20	0,20	0,20
10,8	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20
10,9	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20
11	0,21	0,21	0,20	0,20	0,21
11,1	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20
11,2	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20
11,3	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20
11,4	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20
11,5	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20
11,6	0,21	0,21	0,21	0,20	0,21
11,7	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20
11,8	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20
11,9	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
12	0,21	0,21	0,21	0,20	0,21
12,1	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20
12,2	0,22	0,21	0,21	0,20	0,21
12,3	0,22	0,21	0,21	0,20	0,21
12,4	0,22	0,22	0,21	0,20	0,20
12,5	0,22	0,22	0,21	0,20	0,21
12,6	0,22	0,22	0,22	0,20	0,21
12,7	0,22	0,22	0,21	0,21	0,21
12,8	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21

12,9	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21
13	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21
13,1	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21
13,2	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21
13,3	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21
13,4	0,23	0,22	0,22	0,21	0,21
13,5	0,23	0,22	0,22	0,21	0,21
13,6	0,23	0,23	0,22	0,21	0,21
13,7	0,23	0,23	0,22	0,21	0,21
13,8	0,23	0,23	0,22	0,21	0,21
13,9	0,23	0,23	0,22	0,21	0,22
14	0,23	0,23	0,22	0,21	0,22
14,1	0,23	0,23	0,22	0,21	0,22
14,2	0,23	0,23	0,23	0,21	0,22
14,3	0,23	0,23	0,23	0,21	0,22
14,4	0,23	0,23	0,23	0,21	0,22
14,5	0,24	0,23	0,23	0,21	0,22
14,6	0,24	0,23	0,23	0,21	0,22
14,7	0,24	0,24	0,23	0,21	0,22
14,8	0,24	0,24	0,23	0,22	0,22
14,9	0,24	0,24	0,23	0,22	0,22
15	0,24	0,24	0,23	0,22	0,22
15,1	0,24	0,24	0,23	0,22	0,22
15,2	0,24	0,24	0,23	0,22	0,22
15,3	0,24	0,24	0,23	0,22	0,22
15,4	0,24	0,24	0,23	0,22	0,22
15,5	0,24	0,24	0,24	0,23	0,23
15,6	0,24	0,24	0,24	0,23	0,23
15,7	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23
15,8	0,25	0,24	0,24	0,22	0,23

15,9	0,25	0,25	0,24	0,22	0,23
16	0,25	0,25	0,24	0,23	0,23
16,1	0,25	0,25	0,24	0,23	0,23
16,2	0,25	0,25	0,24	0,23	0,23
16,3	0,26	0,25	0,24	0,23	0,23
16,4	0,26	0,25	0,24	0,23	0,23
16,5	0,26	0,25	0,25	0,24	0,23
16,6	0,26	0,25	0,25	0,23	0,23
16,7	0,26	0,25	0,25	0,23	0,24
16,8	0,26	0,26	0,25	0,23	0,24
16,9	0,26	0,26	0,25	0,24	0,24
17	0,26	0,26	0,25	0,25	0,24
17,1	0,27	0,26	0,25	0,23	0,24
17,2	0,27	0,26	0,25	0,24	0,24
17,3	0,27	0,26	0,25	0,24	0,24
17,4	0,27	0,26	0,25	0,24	0,24
17,5	0,27	0,26	0,26	0,24	0,24
17,6	0,27	0,27	0,26	0,24	0,24
17,7	0,28	0,27	0,26	0,24	0,24
17,8	0,28	0,27	0,26	0,25	0,25
17,9	0,28	0,27	0,26	0,26	0,24
18	0,28	0,27	0,26	0,25	0,25
18,1	0,28	0,27	0,26	0,26	0,25
18,2	0,28	0,27	0,26	0,25	0,25
18,3	0,29	0,28	0,26	0,25	0,25
18,4	0,29	0,28	0,27	0,25	0,25
18,5	0,29	0,28	0,27	0,26	0,25
18,6	0,29	0,28	0,27	0,26	0,25
18,7	0,29	0,28	0,27	0,26	0,26
18,8	0,29	0,28	0,27	0,25	0,26

18,9	0,30	0,29	0,27	0,26	0,25
19	0,30	0,29	0,27	0,26	0,26
19,1	0,30	0,29	0,28	0,26	0,26
19,2	0,30	0,29	0,28	0,26	0,26
19,3	0,31	0,29	0,28	0,26	0,26
19,4	0,31	0,30	0,28	0,27	0,26
19,5	0,31	0,30	0,28	0,27	0,27
19,6	0,31	0,30	0,28	0,27	0,26
19,7	0,32	0,30	0,29	0,27	0,27
19,8	0,32	0,30	0,29	0,27	0,27
19,9	0,32	0,31	0,29	0,27	0,27
20	0,33	0,31	0,29	0,27	0,27
20,1	0,33	0,31	0,30	0,27	0,27
20,2	0,33	0,31	0,30	0,27	0,27
20,3	0,33	0,32	0,30	0,27	0,27
20,4	0,34	0,32	0,30	0,28	0,28
20,5	0,34	0,32	0,30	0,28	0,28
20,6	0,35	0,32	0,31	0,28	0,28
20,7	0,35	0,33	0,31	0,28	0,28
20,8	0,35	0,33	0,31	0,29	0,28
20,9	0,36	0,33	0,31	0,29	0,28
21	0,36	0,34	0,31	0,29	0,28
21,1	0,37	0,34	0,32	0,29	0,28
21,2	0,37	0,34	0,32	0,29	0,29
21,3	0,38	0,35	0,32	0,29	0,29
21,4	0,38	0,35	0,32	0,30	0,29
21,5	0,39	0,35	0,33	0,30	0,30
21,6	0,39	0,36	0,33	0,31	0,30
21,7	0,40	0,36	0,33	0,31	0,30
21,8	0,40	0,36	0,34	0,31	0,30

21,9	0,41	0,37	0,34	0,32	0,30
22	0,41	0,37	0,34	0,31	0,30
22,1	0,42	0,38	0,35	0,31	0,30
22,2	0,43	0,38	0,35	0,32	0,31
22,3	0,44	0,39	0,35	0,32	0,31
22,4	0,44	0,39	0,36	0,32	0,31
22,5	0,45	0,40	0,36	0,32	0,31
22,6	0,46	0,40	0,36	0,33	0,31
22,7	0,47	0,41	0,37	0,33	0,32
22,8	0,48	0,42	0,37	0,34	0,32
22,9	0,49	0,42	0,38	0,34	0,32
23	0,51	0,43	0,38	0,34	0,32
23,1	0,52	0,44	0,38	0,35	0,33
23,2	0,54	0,44	0,39	0,36	0,33
23,3	0,56	0,45	0,39	0,35	0,33
23,4	0,57	0,46	0,40	0,36	0,34
23,5	0,60	0,47	0,41	0,36	0,34
23,6	0,62	0,48	0,41	0,36	0,34
23,7	0,65	0,49	0,42	0,37	0,34
23,8	0,69	0,50	0,43	0,37	0,35
23,9	0,73	0,52	0,43	0,37	0,35
24	0,79	0,53	0,44	0,38	0,35
24,1	0,85	0,55	0,45	0,38	0,36
24,2	0,91	0,56	0,46	0,39	0,36
24,3	0,96	0,58	0,47	0,39	0,36
24,4	1,00	0,61	0,48	0,40	0,37
24,5	1,00	0,63	0,49	0,41	0,37
24,6	0,95	0,66	0,50	0,42	0,37
24,7	0,85	0,70	0,51	0,42	0,38
24,8	0,70	0,75	0,52	0,43	0,38

24,9	0,54	0,80	0,54	0,44	0,39
25	0,37	0,85	0,55	0,44	0,39
25,1	0,24	0,92	0,57	0,45	0,40
25,2	0,14	0,97	0,59	0,46	0,40
25,3	0,07	1,00	0,61	0,47	0,41
25,4	0,03	1,00	0,64	0,48	0,41
25,5	0,01	0,95	0,67	0,48	0,42
25,6	0,00	0,86	0,71	0,50	0,43
25,7	0,00	0,72	0,75	0,51	0,44
25,8	0,00	0,55	0,80	0,53	0,44
25,9	0,00	0,40	0,86	0,54	0,45
26	0,00	0,26	0,92	0,56	0,46
26,1	0,00	0,15	0,97	0,58	0,47
26,2	0,00	0,08	1,00	0,60	0,47
26,3	0,00	0,04	1,00	0,63	0,49
26,4	0,00	0,02	0,96	0,66	0,49
26,5	0,00	0,01	0,87	0,70	0,51
26,6	0,00	0,00	0,74	0,74	0,52
26,7	0,00	0,00	0,59	0,79	0,53
26,8	0,00	0,00	0,43	0,83	0,55
26,9	0,00	0,00	0,29	0,88	0,57
27	0,00	0,00	0,19	0,96	0,59
27,1	0,00	0,00	0,11	0,98	0,61
27,2	0,00	0,00	0,05	1,00	0,63
27,3	0,00	0,00	0,02	0,94	0,66
27,4	0,00	0,00	0,01	0,86	0,70
27,5	0,00	0,00	0,00	0,78	0,74
27,6	0,00	0,00	0,00	0,66	0,78
27,7	0,00	0,00	0,00	0,50	0,83
27,8	0,00	0,00	0,00	0,36	0,88

27,9	0,00	0,00	0,00	0,25	0,93
28	0,00	0,00	0,00	0,16	0,97
28,1	0,00	0,00	0,00	0,08	1,00
28,2	0,00	0,00	0,00	0,04	0,98
28,3	0,00	0,00	0,00	0,02	0,91
28,4	0,00	0,00	0,00	0,01	0,82
28,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,69
28,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,55
28,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41
28,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27
28,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18
29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10
29,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06
29,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
29,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
29,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
29,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

30,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

2.2 Symulacje wiązek o energetycznym rozkładzie Gaussa

2.2.1 Wiązki o energii średniej 60 MeV i rozmyciach energetycznych 0,2 MeV, 0,4 MeV, 0,6 MeV, 0,8 MeV i 1,0 MeV.

Tabela 2.2: Rozkłady dawki na głębokości dla wiązek energii średniej 60 MeV i rozmyciach energetycznych 0,2 MeV, 0,4 MeV, 0,6 MeV, 0,8 MeV i 1,0 MeV. Wiązki te porównane są z wiązką monoenergetyczną o energii 60 MeV (rozmycie 0 MeV)

Głębokość	Dawka względna					
	0 MeV	0,2 MeV	0,4 MeV	0,6 MeV	0,8 MeV	1 MeV
0,10	0,16	0,17	0,19	0,21	0,24	0,25
0,20	0,16	0,17	0,19	0,21	0,24	0,26
0,30	0,16	0,17	0,19	0,21	0,24	0,26

0,40	0,16	0,17	0,19	0,21	0,24	0,26
0,50	0,18	0,17	0,19	0,21	0,24	0,26
0,60	0,16	0,17	0,19	0,22	0,24	0,26
0,70	0,16	0,17	0,19	0,22	0,24	0,26
0,80	0,16	0,17	0,20	0,22	0,24	0,26
0,90	0,16	0,17	0,19	0,22	0,24	0,26
1,00	0,16	0,17	0,19	0,22	0,24	0,26
1,10	0,17	0,17	0,20	0,22	0,24	0,26
1,20	0,16	0,17	0,20	0,22	0,24	0,26
1,30	0,16	0,17	0,20	0,22	0,24	0,26
1,40	0,17	0,17	0,20	0,22	0,24	0,26
1,50	0,16	0,17	0,20	0,22	0,24	0,26
1,60	0,17	0,18	0,20	0,22	0,25	0,26
1,70	0,17	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26
1,80	0,17	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26
1,90	0,16	0,18	0,20	0,22	0,24	0,27
2,00	0,17	0,18	0,20	0,22	0,24	0,27
2,10	0,18	0,18	0,20	0,22	0,24	0,27
2,20	0,17	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26
2,30	0,16	0,18	0,20	0,22	0,25	0,27
2,40	0,17	0,18	0,20	0,22	0,24	0,26
2,50	0,17	0,18	0,20	0,23	0,24	0,26
2,60	0,17	0,18	0,20	0,23	0,25	0,27
2,70	0,17	0,18	0,20	0,23	0,25	0,27
2,80	0,17	0,18	0,20	0,23	0,25	0,27
2,90	0,17	0,19	0,20	0,23	0,25	0,27
3,00	0,17	0,18	0,20	0,23	0,25	0,27
3,10	0,17	0,18	0,20	0,23	0,25	0,27
3,20	0,16	0,18	0,20	0,23	0,25	0,27
3,30	0,17	0,18	0,20	0,23	0,25	0,27

3,40	0,17	0,18	0,20	0,23	0,25	0,27
3,50	0,17	0,18	0,20	0,23	0,25	0,27
3,60	0,17	0,18	0,20	0,23	0,25	0,27
3,70	0,17	0,18	0,20	0,23	0,25	0,27
3,80	0,17	0,18	0,20	0,23	0,25	0,27
3,90	0,17	0,18	0,20	0,23	0,25	0,27
4,00	0,18	0,18	0,21	0,23	0,25	0,27
4,10	0,17	0,19	0,20	0,23	0,26	0,28
4,20	0,17	0,18	0,21	0,23	0,26	0,28
4,30	0,17	0,18	0,21	0,23	0,25	0,27
4,40	0,17	0,18	0,21	0,23	0,26	0,28
4,50	0,18	0,19	0,21	0,23	0,26	0,28
4,60	0,20	0,19	0,21	0,23	0,26	0,28
4,70	0,17	0,18	0,21	0,23	0,26	0,28
4,80	0,17	0,19	0,21	0,23	0,26	0,28
4,90	0,17	0,19	0,21	0,23	0,26	0,28
5,00	0,17	0,19	0,21	0,24	0,26	0,28
5,10	0,17	0,19	0,21	0,24	0,26	0,28
5,20	0,17	0,19	0,21	0,23	0,26	0,28
5,30	0,18	0,19	0,21	0,24	0,26	0,28
5,40	0,18	0,19	0,21	0,24	0,26	0,28
5,50	0,18	0,19	0,21	0,24	0,26	0,28
5,60	0,18	0,19	0,21	0,24	0,26	0,28
5,70	0,18	0,19	0,21	0,24	0,26	0,28
5,80	0,18	0,19	0,21	0,24	0,26	0,28
5,90	0,17	0,19	0,21	0,24	0,26	0,28
6,00	0,17	0,19	0,21	0,24	0,26	0,29
6,10	0,18	0,19	0,21	0,24	0,26	0,29
6,20	0,18	0,19	0,21	0,24	0,26	0,29
6,30	0,18	0,19	0,21	0,24	0,27	0,29

6,40	0,18	0,19	0,22	0,24	0,26	0,29
6,50	0,18	0,20	0,22	0,24	0,27	0,29
6,60	0,18	0,19	0,22	0,25	0,27	0,29
6,70	0,18	0,19	0,22	0,24	0,27	0,29
6,80	0,18	0,19	0,22	0,24	0,27	0,29
6,90	0,18	0,19	0,22	0,24	0,27	0,29
7,00	0,18	0,19	0,22	0,24	0,27	0,29
7,10	0,18	0,19	0,22	0,24	0,27	0,29
7,20	0,18	0,19	0,22	0,24	0,27	0,29
7,30	0,18	0,20	0,22	0,25	0,27	0,29
7,40	0,18	0,20	0,22	0,25	0,27	0,29
7,50	0,18	0,20	0,22	0,25	0,27	0,29
7,60	0,18	0,20	0,22	0,25	0,27	0,30
7,70	0,18	0,20	0,22	0,25	0,27	0,29
7,80	0,18	0,20	0,22	0,25	0,27	0,30
7,90	0,19	0,20	0,22	0,25	0,27	0,30
8,00	0,19	0,20	0,22	0,25	0,27	0,30
8,10	0,19	0,20	0,22	0,25	0,27	0,30
8,20	0,19	0,20	0,22	0,25	0,27	0,30
8,30	0,19	0,20	0,22	0,25	0,28	0,30
8,40	0,19	0,20	0,23	0,25	0,28	0,30
8,50	0,19	0,20	0,22	0,26	0,28	0,30
8,60	0,19	0,20	0,22	0,25	0,28	0,30
8,70	0,19	0,20	0,23	0,26	0,28	0,30
8,80	0,19	0,20	0,23	0,25	0,28	0,30
8,90	0,19	0,20	0,23	0,25	0,28	0,30
9,00	0,19	0,20	0,23	0,26	0,28	0,30
9,10	0,20	0,20	0,23	0,25	0,28	0,30
9,20	0,19	0,20	0,23	0,25	0,28	0,30
9,30	0,19	0,21	0,23	0,26	0,28	0,31

9,40	0,19	0,21	0,23	0,26	0,28	0,31
9,50	0,19	0,21	0,23	0,26	0,28	0,31
9,60	0,20	0,21	0,23	0,26	0,29	0,31
9,70	0,19	0,21	0,23	0,26	0,29	0,31
9,80	0,19	0,21	0,23	0,26	0,29	0,31
9,90	0,19	0,21	0,23	0,26	0,29	0,31
10,00	0,19	0,21	0,23	0,26	0,29	0,31
10,10	0,19	0,21	0,23	0,26	0,29	0,31
10,20	0,19	0,21	0,23	0,26	0,29	0,31
10,30	0,19	0,21	0,23	0,27	0,29	0,31
10,40	0,20	0,21	0,24	0,26	0,29	0,32
10,50	0,19	0,21	0,24	0,26	0,29	0,32
10,60	0,20	0,21	0,24	0,26	0,29	0,31
10,70	0,20	0,21	0,24	0,27	0,29	0,31
10,80	0,20	0,21	0,24	0,27	0,29	0,32
10,90	0,20	0,21	0,24	0,27	0,29	0,32
11,00	0,20	0,21	0,24	0,27	0,29	0,32
11,10	0,20	0,21	0,24	0,27	0,30	0,32
11,20	0,20	0,22	0,24	0,27	0,29	0,32
11,30	0,20	0,21	0,24	0,27	0,29	0,32
11,40	0,20	0,22	0,24	0,27	0,30	0,32
11,50	0,20	0,21	0,24	0,27	0,29	0,32
11,60	0,20	0,21	0,24	0,27	0,30	0,32
11,70	0,20	0,22	0,24	0,27	0,30	0,33
11,80	0,20	0,22	0,24	0,27	0,30	0,32
11,90	0,21	0,22	0,25	0,28	0,30	0,33
12,00	0,20	0,22	0,25	0,27	0,30	0,33
12,10	0,20	0,22	0,25	0,28	0,30	0,33
12,20	0,20	0,22	0,25	0,28	0,30	0,33
12,30	0,20	0,22	0,25	0,28	0,30	0,33

12,40	0,20	0,22	0,25	0,28	0,30	0,33
12,50	0,20	0,22	0,25	0,28	0,30	0,33
12,60	0,20	0,22	0,25	0,28	0,30	0,33
12,70	0,21	0,22	0,25	0,28	0,31	0,33
12,80	0,22	0,22	0,25	0,28	0,31	0,33
12,90	0,21	0,23	0,25	0,28	0,31	0,34
13,00	0,21	0,23	0,25	0,28	0,31	0,34
13,10	0,21	0,23	0,25	0,28	0,31	0,33
13,20	0,21	0,23	0,25	0,28	0,31	0,34
13,30	0,21	0,23	0,25	0,28	0,31	0,34
13,40	0,21	0,23	0,25	0,29	0,31	0,34
13,50	0,21	0,23	0,26	0,29	0,31	0,34
13,60	0,21	0,23	0,26	0,29	0,31	0,34
13,70	0,21	0,23	0,26	0,29	0,31	0,34
13,80	0,21	0,23	0,26	0,29	0,32	0,34
13,90	0,21	0,23	0,26	0,29	0,32	0,35
14,00	0,21	0,23	0,26	0,29	0,32	0,35
14,10	0,21	0,23	0,26	0,29	0,32	0,35
14,20	0,21	0,24	0,26	0,29	0,33	0,35
14,30	0,21	0,23	0,26	0,29	0,32	0,35
14,40	0,21	0,23	0,26	0,29	0,33	0,35
14,50	0,21	0,23	0,26	0,30	0,32	0,35
14,60	0,21	0,23	0,26	0,30	0,32	0,35
14,70	0,21	0,23	0,27	0,30	0,33	0,35
14,80	0,22	0,24	0,26	0,30	0,33	0,36
14,90	0,22	0,24	0,27	0,30	0,33	0,35
15,00	0,22	0,24	0,27	0,30	0,33	0,36
15,10	0,22	0,24	0,27	0,30	0,33	0,36
15,20	0,22	0,24	0,27	0,30	0,33	0,36
15,30	0,22	0,24	0,27	0,30	0,33	0,36

15,40	0,22	0,24	0,27	0,31	0,33	0,36
15,50	0,23	0,24	0,27	0,30	0,33	0,36
15,60	0,23	0,24	0,27	0,31	0,33	0,36
15,70	0,23	0,24	0,28	0,31	0,34	0,36
15,80	0,22	0,24	0,27	0,31	0,34	0,37
15,90	0,22	0,24	0,28	0,31	0,34	0,37
16,00	0,23	0,25	0,28	0,31	0,34	0,37
16,10	0,23	0,25	0,28	0,31	0,34	0,37
16,20	0,23	0,25	0,28	0,31	0,34	0,37
16,30	0,23	0,25	0,28	0,32	0,34	0,37
16,40	0,23	0,25	0,28	0,32	0,35	0,37
16,50	0,24	0,25	0,28	0,32	0,35	0,37
16,60	0,23	0,25	0,28	0,32	0,35	0,38
16,70	0,23	0,26	0,28	0,32	0,35	0,38
16,80	0,23	0,26	0,29	0,32	0,35	0,38
16,90	0,24	0,25	0,29	0,32	0,35	0,38
17,00	0,25	0,26	0,29	0,32	0,36	0,38
17,10	0,23	0,26	0,29	0,32	0,36	0,38
17,20	0,24	0,26	0,29	0,33	0,36	0,39
17,30	0,24	0,26	0,29	0,32	0,36	0,38
17,40	0,24	0,26	0,29	0,33	0,36	0,39
17,50	0,24	0,26	0,29	0,33	0,36	0,39
17,60	0,24	0,26	0,30	0,33	0,36	0,39
17,70	0,24	0,26	0,29	0,33	0,36	0,40
17,80	0,25	0,26	0,29	0,33	0,37	0,39
17,90	0,26	0,26	0,30	0,33	0,37	0,40
18,00	0,25	0,27	0,30	0,34	0,37	0,40
18,10	0,26	0,27	0,30	0,34	0,37	0,40
18,20	0,25	0,27	0,30	0,34	0,37	0,40
18,30	0,25	0,27	0,30	0,34	0,37	0,40

18,40	0,25	0,27	0,30	0,34	0,38	0,41
18,50	0,26	0,27	0,31	0,34	0,38	0,41
18,60	0,26	0,27	0,31	0,34	0,38	0,41
18,70	0,26	0,27	0,31	0,35	0,38	0,41
18,80	0,25	0,28	0,31	0,35	0,38	0,42
18,90	0,26	0,28	0,31	0,35	0,38	0,42
19,00	0,26	0,28	0,31	0,35	0,39	0,42
19,10	0,26	0,28	0,31	0,35	0,39	0,42
19,20	0,26	0,28	0,32	0,36	0,39	0,42
19,30	0,26	0,28	0,32	0,36	0,39	0,42
19,40	0,27	0,28	0,32	0,36	0,39	0,43
19,50	0,27	0,29	0,32	0,36	0,40	0,43
19,60	0,27	0,29	0,32	0,36	0,40	0,43
19,70	0,27	0,29	0,33	0,37	0,40	0,43
19,80	0,27	0,29	0,33	0,37	0,40	0,44
19,90	0,27	0,29	0,33	0,37	0,41	0,44
20,00	0,27	0,29	0,33	0,37	0,41	0,44
20,10	0,27	0,30	0,33	0,37	0,41	0,44
20,20	0,27	0,30	0,33	0,37	0,41	0,45
20,30	0,27	0,30	0,33	0,38	0,41	0,45
20,40	0,28	0,30	0,34	0,38	0,42	0,45
20,50	0,28	0,30	0,34	0,38	0,42	0,46
20,60	0,28	0,30	0,34	0,39	0,42	0,46
20,70	0,28	0,31	0,34	0,39	0,42	0,46
20,80	0,29	0,31	0,35	0,39	0,43	0,46
20,90	0,29	0,31	0,35	0,39	0,43	0,47
21,00	0,29	0,31	0,35	0,39	0,43	0,47
21,10	0,29	0,31	0,35	0,40	0,44	0,47
21,20	0,29	0,32	0,35	0,40	0,44	0,48
21,30	0,29	0,32	0,36	0,40	0,44	0,48

21,40	0,30	0,32	0,36	0,41	0,45	0,49
21,50	0,30	0,32	0,36	0,41	0,45	0,49
21,60	0,31	0,33	0,37	0,41	0,45	0,49
21,70	0,31	0,33	0,37	0,41	0,46	0,49
21,80	0,31	0,33	0,37	0,42	0,46	0,50
21,90	0,32	0,33	0,37	0,42	0,46	0,50
22,00	0,31	0,33	0,38	0,42	0,47	0,50
22,10	0,31	0,34	0,38	0,43	0,47	0,51
22,20	0,32	0,34	0,38	0,43	0,48	0,51
22,30	0,32	0,34	0,39	0,43	0,48	0,52
22,40	0,32	0,34	0,39	0,44	0,48	0,52
22,50	0,32	0,35	0,39	0,44	0,49	0,53
22,60	0,33	0,35	0,40	0,44	0,49	0,53
22,70	0,33	0,35	0,40	0,45	0,50	0,54
22,80	0,34	0,36	0,40	0,45	0,50	0,54
22,90	0,34	0,36	0,41	0,45	0,51	0,55
23,00	0,34	0,36	0,41	0,46	0,51	0,55
23,10	0,35	0,37	0,42	0,47	0,52	0,56
23,20	0,36	0,37	0,42	0,47	0,52	0,57
23,30	0,35	0,38	0,42	0,47	0,53	0,57
23,40	0,36	0,38	0,43	0,48	0,53	0,58
23,50	0,36	0,38	0,43	0,49	0,54	0,59
23,60	0,36	0,39	0,44	0,49	0,54	0,59
23,70	0,37	0,39	0,44	0,50	0,55	0,60
23,80	0,37	0,40	0,45	0,50	0,56	0,61
23,90	0,37	0,40	0,45	0,51	0,57	0,62
24,00	0,38	0,41	0,46	0,52	0,57	0,63
24,10	0,38	0,41	0,46	0,52	0,58	0,64
24,20	0,39	0,42	0,47	0,53	0,59	0,65
24,30	0,39	0,42	0,48	0,54	0,60	0,66

24,40	0,40	0,43	0,48	0,55	0,61	0,67
24,50	0,41	0,43	0,49	0,55	0,62	0,68
24,60	0,42	0,44	0,50	0,56	0,63	0,69
24,70	0,42	0,45	0,51	0,57	0,64	0,71
24,80	0,43	0,46	0,52	0,58	0,65	0,72
24,90	0,44	0,47	0,53	0,59	0,66	0,73
25,00	0,44	0,47	0,54	0,60	0,68	0,75
25,10	0,45	0,48	0,55	0,62	0,69	0,76
25,20	0,46	0,49	0,56	0,63	0,71	0,78
25,30	0,47	0,50	0,57	0,65	0,73	0,80
25,40	0,48	0,52	0,58	0,66	0,75	0,82
25,50	0,48	0,53	0,60	0,68	0,77	0,84
25,60	0,50	0,54	0,61	0,70	0,79	0,86
25,70	0,51	0,55	0,63	0,72	0,81	0,89
25,80	0,53	0,57	0,65	0,74	0,83	0,90
25,90	0,54	0,58	0,67	0,77	0,86	0,92
26,00	0,56	0,60	0,69	0,80	0,89	0,94
26,10	0,58	0,62	0,72	0,82	0,91	0,96
26,20	0,60	0,65	0,75	0,86	0,93	0,97
26,30	0,63	0,68	0,79	0,88	0,95	0,98
26,40	0,66	0,71	0,82	0,91	0,97	0,99
26,50	0,70	0,74	0,86	0,94	0,98	1,00
26,60	0,74	0,79	0,89	0,97	1,00	1,00
26,70	0,79	0,84	0,93	0,98	1,00	1,00
26,80	0,83	0,89	0,96	0,99	0,99	0,99
26,90	0,88	0,93	0,98	1,00	0,99	0,98
27,00	0,96	0,97	1,00	1,00	0,97	0,97
27,10	0,98	1,00	1,00	0,97	0,96	0,95
27,20	1,00	0,99	0,97	0,94	0,92	0,93
27,30	0,94	0,95	0,92	0,90	0,88	0,89

27,40	0,86	0,88	0,86	0,86	0,84	0,85
27,50	0,78	0,78	0,78	0,79	0,80	0,80
27,60	0,66	0,66	0,69	0,72	0,74	0,76
27,70	0,50	0,52	0,58	0,64	0,68	0,71
27,80	0,36	0,39	0,48	0,57	0,62	0,67
27,90	0,25	0,28	0,38	0,49	0,56	0,61
28,00	0,16	0,19	0,31	0,42	0,50	0,57
28,10	0,08	0,12	0,22	0,35	0,44	0,51
28,20	0,04	0,07	0,16	0,28	0,38	0,46
28,30	0,02	0,04	0,11	0,23	0,33	0,41
28,40	0,01	0,02	0,08	0,18	0,28	0,37
28,50	0,00	0,01	0,05	0,14	0,23	0,32
28,60	0,00	0,01	0,04	0,11	0,20	0,28
28,70	0,00	0,00	0,02	0,08	0,16	0,24
28,80	0,00	0,00	0,01	0,05	0,13	0,20
28,90	0,00	0,00	0,01	0,04	0,10	0,17
29,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,08	0,15
29,10	0,00	0,00	0,00	0,02	0,06	0,12
29,20	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,10
29,30	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,08
29,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,07
29,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,05
29,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04
29,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03
29,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03
29,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
30,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
30,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
30,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
30,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01

30,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
30,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
32,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

2.2.2 Wiązki o energii średniej 60,2 MeV i rozmyciach energetycznych 0,2 MeV i 0,4 MeV.

Tabela 2.3: Rozkłady dawki na głębokości dla wiązek energii średniej 60,2 MeV i rozmyciach energetycznych 0,2 MeV, 0,4 MeV.

Głębokość	Dawka względna	
	0,4 MeV	0,2 MeV
0,1	0,18	0,17
0,2	0,18	0,17
0,3	0,18	0,17
0,4	0,18	0,17

0,5	0,18	0,17
0,6	0,18	0,17
0,7	0,18	0,17
0,8	0,18	0,17
0,9	0,18	0,17
1	0,18	0,17
1,1	0,18	0,17
1,2	0,18	0,17
1,3	0,18	0,17
1,4	0,18	0,17
1,5	0,18	0,17
1,6	0,18	0,17
1,7	0,18	0,17
1,8	0,19	0,17
1,9	0,18	0,17
2	0,18	0,17
2,1	0,18	0,17
2,2	0,18	0,17
2,3	0,19	0,17
2,4	0,19	0,17
2,5	0,19	0,17
2,6	0,19	0,17
2,7	0,18	0,17
2,8	0,18	0,17
2,9	0,19	0,17
3	0,19	0,17
3,1	0,19	0,17
3,2	0,19	0,18
3,3	0,19	0,18
3,4	0,19	0,18

3,5	0,19	0,18
3,6	0,19	0,18
3,7	0,19	0,18
3,8	0,19	0,18
3,9	0,19	0,18
4	0,19	0,18
4,1	0,19	0,18
4,2	0,19	0,18
4,3	0,19	0,18
4,4	0,19	0,18
4,5	0,19	0,18
4,6	0,19	0,18
4,7	0,19	0,18
4,8	0,19	0,18
4,9	0,19	0,18
5	0,19	0,18
5,1	0,20	0,18
5,2	0,20	0,18
5,3	0,19	0,18
5,4	0,20	0,18
5,5	0,19	0,18
5,6	0,20	0,18
5,7	0,19	0,18
5,8	0,19	0,18
5,9	0,19	0,18
6	0,20	0,18
6,1	0,20	0,18
6,2	0,20	0,18
6,3	0,20	0,19
6,4	0,20	0,19

6,5	0,20	0,19
6,6	0,20	0,19
6,7	0,20	0,19
6,8	0,20	0,19
6,9	0,20	0,19
7	0,20	0,19
7,1	0,20	0,19
7,2	0,20	0,19
7,3	0,20	0,19
7,4	0,20	0,19
7,5	0,20	0,19
7,6	0,20	0,19
7,7	0,20	0,19
7,8	0,21	0,19
7,9	0,20	0,19
8	0,21	0,19
8,1	0,21	0,19
8,2	0,21	0,19
8,3	0,21	0,19
8,4	0,21	0,19
8,5	0,21	0,19
8,6	0,21	0,19
8,7	0,21	0,19
8,8	0,21	0,19
8,9	0,21	0,19
9	0,21	0,19
9,1	0,21	0,19
9,2	0,21	0,20
9,3	0,21	0,20
9,4	0,21	0,20

9,5	0,21	0,20
9,6	0,21	0,20
9,7	0,21	0,20
9,8	0,22	0,20
9,9	0,21	0,20
10	0,21	0,20
10,1	0,22	0,20
10,2	0,22	0,20
10,3	0,22	0,20
10,4	0,22	0,20
10,5	0,22	0,20
10,6	0,22	0,20
10,7	0,22	0,20
10,8	0,22	0,20
10,9	0,22	0,20
11	0,22	0,20
11,1	0,22	0,20
11,2	0,22	0,20
11,3	0,23	0,21
11,4	0,22	0,21
11,5	0,23	0,21
11,6	0,23	0,21
11,7	0,22	0,21
11,8	0,23	0,21
11,9	0,23	0,21
12	0,23	0,21
12,1	0,23	0,21
12,2	0,23	0,21
12,3	0,23	0,21
12,4	0,23	0,21

12,5	0,23	0,21
12,6	0,23	0,21
12,7	0,23	0,21
12,8	0,23	0,21
12,9	0,23	0,21
13	0,23	0,21
13,1	0,23	0,21
13,2	0,23	0,22
13,3	0,24	0,22
13,4	0,24	0,22
13,5	0,24	0,22
13,6	0,24	0,22
13,7	0,24	0,22
13,8	0,24	0,22
13,9	0,24	0,22
14	0,24	0,22
14,1	0,24	0,22
14,2	0,24	0,22
14,3	0,24	0,22
14,4	0,24	0,22
14,5	0,24	0,22
14,6	0,25	0,22
14,7	0,25	0,22
14,8	0,25	0,23
14,9	0,25	0,23
15	0,25	0,23
15,1	0,25	0,23
15,2	0,25	0,23
15,3	0,25	0,23
15,4	0,25	0,23

15,5	0,25	0,23
15,6	0,25	0,23
15,7	0,26	0,23
15,8	0,25	0,23
15,9	0,26	0,23
16	0,26	0,23
16,1	0,26	0,24
16,2	0,26	0,24
16,3	0,26	0,24
16,4	0,26	0,24
16,5	0,26	0,24
16,6	0,26	0,24
16,7	0,27	0,24
16,8	0,27	0,24
16,9	0,27	0,24
17	0,27	0,24
17,1	0,27	0,24
17,2	0,27	0,25
17,3	0,27	0,25
17,4	0,27	0,25
17,5	0,27	0,25
17,6	0,27	0,25
17,7	0,27	0,25
17,8	0,28	0,25
17,9	0,28	0,25
18	0,28	0,25
18,1	0,28	0,25
18,2	0,28	0,26
18,3	0,28	0,26
18,4	0,29	0,26

18,5	0,29	0,26
18,6	0,29	0,26
18,7	0,29	0,26
18,8	0,29	0,26
18,9	0,29	0,26
19	0,29	0,26
19,1	0,30	0,27
19,2	0,30	0,27
19,3	0,30	0,27
19,4	0,30	0,27
19,5	0,30	0,27
19,6	0,30	0,27
19,7	0,31	0,27
19,8	0,31	0,27
19,9	0,31	0,28
20	0,31	0,28
20,1	0,31	0,28
20,2	0,31	0,28
20,3	0,31	0,28
20,4	0,32	0,28
20,5	0,32	0,29
20,6	0,32	0,29
20,7	0,32	0,29
20,8	0,33	0,29
20,9	0,32	0,29
21	0,33	0,29
21,1	0,33	0,29
21,2	0,33	0,30
21,3	0,33	0,30
21,4	0,34	0,30

21,5	0,34	0,30
21,6	0,34	0,30
21,7	0,34	0,31
21,8	0,34	0,31
21,9	0,35	0,31
22	0,35	0,31
22,1	0,35	0,32
22,2	0,35	0,32
22,3	0,36	0,32
22,4	0,36	0,32
22,5	0,36	0,32
22,6	0,37	0,33
22,7	0,37	0,33
22,8	0,37	0,33
22,9	0,37	0,33
23	0,38	0,34
23,1	0,38	0,34
23,2	0,39	0,34
23,3	0,39	0,35
23,4	0,39	0,35
23,5	0,39	0,35
23,6	0,40	0,36
23,7	0,40	0,36
23,8	0,41	0,36
23,9	0,41	0,37
24	0,42	0,37
24,1	0,42	0,37
24,2	0,42	0,38
24,3	0,43	0,38
24,4	0,43	0,39

24,5	0,44	0,39
24,6	0,44	0,40
24,7	0,45	0,40
24,8	0,45	0,41
24,9	0,46	0,41
25	0,47	0,42
25,1	0,47	0,42
25,2	0,48	0,43
25,3	0,49	0,43
25,4	0,50	0,44
25,5	0,50	0,45
25,6	0,51	0,46
25,7	0,52	0,46
25,8	0,53	0,47
25,9	0,54	0,48
26	0,55	0,49
26,1	0,57	0,50
26,2	0,58	0,51
26,3	0,60	0,52
26,4	0,61	0,54
26,5	0,63	0,55
26,6	0,65	0,57
26,7	0,67	0,59
26,8	0,69	0,60
26,9	0,72	0,63
27	0,75	0,65
27,1	0,78	0,68
27,2	0,82	0,71
27,3	0,86	0,75
27,4	0,91	0,80

27,5	0,95	0,85
27,6	0,98	0,89
27,7	1,00	0,94
27,8	1,00	0,98
27,9	0,98	1,00
28	0,97	1,00
28,1	0,97	0,98
28,2	0,89	0,91
28,3	0,82	0,83
28,4	0,73	0,72
28,5	0,62	0,60
28,6	0,58	0,47
28,7	0,48	0,35
28,8	0,35	0,25
28,9	0,27	0,16
29	0,21	0,10
29,1	0,17	0,07
29,2	0,13	0,03
29,3	0,08	0,02
29,4	0,05	0,01
29,5	0,04	0,00
29,6	0,02	0,00
29,7	0,02	0,00
29,8	0,01	0,00
29,9	0,01	0,00
30	0,00	0,00
30,1	0,00	0,00
30,2	0,00	0,00
30,3	0,00	0,00
30,4	0,00	0,00

30,5	0,00	0,00
30,6	0,00	0,00
30,7	0,00	0,00
30,8	0,00	0,00
30,9	0,00	0,00
31	0,00	0,00
31,1	0,00	0,00
31,2	0,00	0,00
31,3	0,00	0,00
31,4	0,00	0,00
31,5	0,00	0,00
31,6	0,00	0,00
31,7	0,00	0,00
31,8	0,00	0,00
31,9	0,00	0,00
32	0,00	0,00

2.3 Symulacje wiązek o energetycznym rozkładzie Gaussa zmodyfikowanym poprzez wstawienie instrukcji warunkowej określającej maksymalną energię wiązki.

Tabela 2.4: Rozkład dawki na głębokości dla wiązki protonów. Pierwotny rozkład energetyczny był rozkładem normalnym o energii średniej 60 MeV i odchyleniu standardowym 0,5 MeV. Został on zmieniony poprzez ustanowienie maksymalnej energii, powyżej której protony nie są symulowane. W tabeli zestawiono rozkłady dawki, dla których energia maksymalna to 60,2 MeV, 60,3 MeV, 60,5 MeV i 65 MeV.

Głębokość [mm]	Energia maksymalna [MeV]			
	60,2	60,3	60,05	62
0,1	0,19	0,18	0,17	0,18
0,2	0,19	0,19	0,17	0,19
0,3	0,19	0,18	0,17	0,18
0,4	0,19	0,18	0,17	0,19
0,5	0,19	0,19	0,17	0,19
0,6	0,19	0,19	0,17	0,19
0,7	0,19	0,19	0,17	0,19
0,8	0,19	0,19	0,17	0,19
0,9	0,19	0,18	0,17	0,19
1	0,19	0,18	0,17	0,19
1,1	0,19	0,19	0,17	0,19
1,2	0,19	0,19	0,17	0,19
1,3	0,19	0,2	0,17	0,19
1,4	0,19	0,19	0,17	0,19
1,5	0,19	0,19	0,18	0,19
1,6	0,19	0,19	0,17	0,19
1,7	0,19	0,19	0,17	0,19

1,8	0,19	0,19	0,17	0,19
1,9	0,19	0,19	0,18	0,19
2	0,19	0,19	0,18	0,19
2,1	0,19	0,19	0,18	0,19
2,2	0,19	0,19	0,18	0,19
2,3	0,19	0,19	0,18	0,19
2,4	0,19	0,19	0,18	0,19
2,5	0,2	0,19	0,18	0,19
2,6	0,2	0,19	0,18	0,19
2,7	0,2	0,19	0,18	0,19
2,8	0,19	0,19	0,18	0,19
2,9	0,2	0,2	0,18	0,19
3	0,2	0,19	0,18	0,19
3,1	0,2	0,2	0,18	0,19
3,2	0,2	0,2	0,18	0,19
3,3	0,2	0,19	0,18	0,2
3,4	0,2	0,2	0,18	0,2
3,5	0,2	0,19	0,18	0,19
3,6	0,2	0,19	0,18	0,2
3,7	0,2	0,19	0,18	0,2
3,8	0,2	0,2	0,18	0,2
3,9	0,21	0,19	0,18	0,2
4	0,2	0,2	0,18	0,2
4,1	0,2	0,2	0,18	0,2
4,2	0,2	0,2	0,18	0,2
4,3	0,2	0,2	0,18	0,2
4,4	0,2	0,2	0,18	0,2
4,5	0,2	0,2	0,18	0,2
4,6	0,2	0,21	0,18	0,2
4,7	0,2	0,21	0,19	0,2

4,8	0,2	0,21	0,18	0,2
4,9	0,2	0,2	0,18	0,2
5	0,2	0,2	0,19	0,2
5,1	0,2	0,2	0,19	0,2
5,2	0,2	0,2	0,19	0,2
5,3	0,21	0,2	0,19	0,2
5,4	0,2	0,2	0,19	0,2
5,5	0,21	0,21	0,19	0,2
5,6	0,2	0,2	0,19	0,2
5,7	0,2	0,2	0,19	0,2
5,8	0,2	0,21	0,19	0,2
5,9	0,21	0,21	0,19	0,2
6	0,21	0,21	0,19	0,21
6,1	0,21	0,21	0,19	0,2
6,2	0,21	0,21	0,19	0,21
6,3	0,21	0,21	0,19	0,21
6,4	0,21	0,21	0,19	0,21
6,5	0,21	0,21	0,19	0,21
6,6	0,21	0,21	0,19	0,21
6,7	0,21	0,21	0,19	0,21
6,8	0,21	0,23	0,19	0,21
6,9	0,21	0,21	0,19	0,21
7	0,21	0,21	0,19	0,21
7,1	0,21	0,21	0,19	0,21
7,2	0,21	0,22	0,19	0,21
7,3	0,21	0,22	0,19	0,21
7,4	0,21	0,22	0,19	0,21
7,5	0,21	0,22	0,19	0,21
7,6	0,21	0,22	0,2	0,21
7,7	0,21	0,22	0,2	0,21

7,8	0,22	0,22	0,2	0,21
7,9	0,22	0,22	0,2	0,21
8	0,21	0,22	0,2	0,21
8,1	0,22	0,22	0,2	0,21
8,2	0,21	0,22	0,2	0,21
8,3	0,22	0,21	0,2	0,22
8,4	0,22	0,22	0,2	0,22
8,5	0,22	0,22	0,2	0,21
8,6	0,22	0,22	0,2	0,22
8,7	0,22	0,22	0,2	0,22
8,8	0,22	0,22	0,2	0,22
8,9	0,22	0,22	0,2	0,22
9	0,22	0,22	0,2	0,22
9,1	0,22	0,22	0,2	0,22
9,2	0,22	0,22	0,2	0,22
9,3	0,22	0,22	0,2	0,22
9,4	0,22	0,22	0,2	0,22
9,5	0,22	0,22	0,2	0,22
9,6	0,22	0,22	0,2	0,22
9,7	0,23	0,22	0,2	0,22
9,8	0,22	0,22	0,21	0,22
9,9	0,23	0,22	0,21	0,22
10	0,22	0,23	0,21	0,22
10,1	0,23	0,22	0,21	0,22
10,2	0,22	0,22	0,21	0,22
10,3	0,23	0,22	0,21	0,23
10,4	0,23	0,23	0,21	0,23
10,5	0,23	0,23	0,21	0,23
10,6	0,23	0,23	0,21	0,23
10,7	0,23	0,23	0,21	0,23

10,8	0,23	0,23	0,21	0,23
10,9	0,23	0,23	0,21	0,23
11	0,23	0,23	0,21	0,23
11,1	0,23	0,22	0,21	0,23
11,2	0,23	0,23	0,21	0,23
11,3	0,23	0,23	0,21	0,23
11,4	0,23	0,23	0,21	0,23
11,5	0,23	0,23	0,21	0,23
11,6	0,23	0,24	0,22	0,23
11,7	0,23	0,23	0,22	0,24
11,8	0,24	0,23	0,22	0,24
11,9	0,24	0,24	0,22	0,24
12	0,24	0,24	0,22	0,24
12,1	0,24	0,24	0,22	0,24
12,2	0,24	0,24	0,22	0,24
12,3	0,24	0,23	0,22	0,24
12,4	0,24	0,24	0,22	0,24
12,5	0,24	0,24	0,22	0,24
12,6	0,24	0,24	0,22	0,24
12,7	0,24	0,25	0,22	0,24
12,8	0,24	0,24	0,22	0,24
12,9	0,24	0,24	0,22	0,24
13	0,24	0,24	0,22	0,24
13,1	0,25	0,24	0,22	0,24
13,2	0,24	0,24	0,23	0,24
13,3	0,25	0,24	0,22	0,24
13,4	0,25	0,24	0,23	0,24
13,5	0,25	0,25	0,23	0,25
13,6	0,25	0,25	0,23	0,25
13,7	0,25	0,25	0,23	0,25

13,8	0,25	0,25	0,23	0,25
13,9	0,25	0,25	0,23	0,25
14	0,25	0,25	0,23	0,25
14,1	0,25	0,25	0,23	0,25
14,2	0,25	0,25	0,23	0,25
14,3	0,25	0,25	0,23	0,25
14,4	0,25	0,25	0,23	0,25
14,5	0,25	0,25	0,23	0,25
14,6	0,26	0,25	0,24	0,26
14,7	0,26	0,25	0,24	0,26
14,8	0,26	0,25	0,24	0,26
14,9	0,26	0,25	0,24	0,26
15	0,26	0,25	0,24	0,26
15,1	0,26	0,26	0,24	0,26
15,2	0,26	0,26	0,24	0,26
15,3	0,26	0,26	0,24	0,26
15,4	0,26	0,26	0,24	0,26
15,5	0,26	0,26	0,24	0,26
15,6	0,26	0,26	0,24	0,26
15,7	0,26	0,26	0,24	0,26
15,8	0,26	0,27	0,24	0,26
15,9	0,26	0,27	0,25	0,27
16	0,26	0,27	0,25	0,27
16,1	0,26	0,26	0,25	0,27
16,2	0,27	0,27	0,25	0,27
16,3	0,27	0,27	0,25	0,27
16,4	0,27	0,28	0,25	0,27
16,5	0,27	0,27	0,25	0,27
16,6	0,27	0,27	0,25	0,27
16,7	0,27	0,27	0,25	0,28

16,8	0,27	0,27	0,25	0,28
16,9	0,27	0,27	0,26	0,28
17	0,28	0,28	0,26	0,28
17,1	0,28	0,27	0,26	0,28
17,2	0,28	0,28	0,26	0,28
17,3	0,28	0,28	0,26	0,28
17,4	0,28	0,28	0,26	0,28
17,5	0,28	0,28	0,26	0,28
17,6	0,28	0,28	0,26	0,29
17,7	0,29	0,28	0,26	0,29
17,8	0,28	0,28	0,27	0,29
17,9	0,28	0,28	0,27	0,29
18	0,29	0,29	0,27	0,29
18,1	0,29	0,28	0,27	0,29
18,2	0,29	0,29	0,27	0,29
18,3	0,29	0,29	0,27	0,29
18,4	0,29	0,29	0,27	0,3
18,5	0,3	0,29	0,27	0,3
18,6	0,29	0,3	0,28	0,3
18,7	0,3	0,3	0,28	0,3
18,8	0,3	0,3	0,28	0,3
18,9	0,3	0,3	0,28	0,3
19	0,3	0,3	0,28	0,3
19,1	0,3	0,3	0,28	0,31
19,2	0,3	0,31	0,28	0,31
19,3	0,31	0,31	0,28	0,31
19,4	0,31	0,31	0,29	0,31
19,5	0,31	0,3	0,29	0,31
19,6	0,31	0,31	0,29	0,31
19,7	0,31	0,31	0,29	0,32

19,8	0,31	0,31	0,29	0,32
19,9	0,32	0,32	0,29	0,32
20	0,32	0,32	0,3	0,32
20,1	0,32	0,31	0,3	0,32
20,2	0,32	0,32	0,3	0,32
20,3	0,32	0,32	0,3	0,33
20,4	0,32	0,33	0,3	0,33
20,5	0,33	0,33	0,31	0,33
20,6	0,33	0,32	0,31	0,33
20,7	0,33	0,33	0,31	0,33
20,8	0,33	0,33	0,31	0,34
20,9	0,33	0,33	0,31	0,34
21	0,34	0,34	0,32	0,34
21,1	0,34	0,33	0,32	0,34
21,2	0,34	0,34	0,32	0,34
21,3	0,34	0,35	0,32	0,35
21,4	0,35	0,34	0,32	0,35
21,5	0,35	0,35	0,33	0,35
21,6	0,35	0,35	0,33	0,35
21,7	0,36	0,35	0,33	0,36
21,8	0,36	0,35	0,33	0,36
21,9	0,36	0,35	0,34	0,36
22	0,36	0,36	0,34	0,36
22,1	0,36	0,36	0,34	0,37
22,2	0,37	0,36	0,34	0,37
22,3	0,37	0,37	0,35	0,37
22,4	0,37	0,37	0,35	0,37
22,5	0,38	0,37	0,35	0,38
22,6	0,38	0,37	0,36	0,38
22,7	0,38	0,37	0,36	0,38

22,8	0,39	0,38	0,36	0,39
22,9	0,39	0,38	0,36	0,39
23	0,4	0,39	0,37	0,39
23,1	0,4	0,39	0,37	0,4
23,2	0,4	0,39	0,38	0,4
23,3	0,4	0,4	0,38	0,4
23,4	0,4	0,4	0,38	0,41
23,5	0,41	0,4	0,39	0,41
23,6	0,42	0,41	0,39	0,42
23,7	0,42	0,41	0,4	0,42
23,8	0,42	0,42	0,4	0,43
23,9	0,43	0,42	0,4	0,43
24	0,43	0,43	0,41	0,44
24,1	0,44	0,43	0,41	0,44
24,2	0,44	0,44	0,42	0,44
24,3	0,45	0,45	0,42	0,45
24,4	0,45	0,45	0,43	0,45
24,5	0,46	0,46	0,44	0,46
24,6	0,47	0,46	0,44	0,47
24,7	0,47	0,47	0,45	0,47
24,8	0,48	0,48	0,46	0,48
24,9	0,49	0,49	0,46	0,49
25	0,5	0,5	0,47	0,49
25,1	0,5	0,5	0,48	0,5
25,2	0,52	0,51	0,49	0,51
25,3	0,53	0,52	0,5	0,52
25,4	0,53	0,53	0,51	0,53
25,5	0,54	0,54	0,52	0,54
25,6	0,56	0,56	0,53	0,55
25,7	0,57	0,57	0,55	0,56

25,8	0,58	0,59	0,56	0,57
25,9	0,6	0,61	0,58	0,59
26	0,61	0,63	0,59	0,6
26,1	0,63	0,64	0,61	0,62
26,2	0,65	0,65	0,63	0,64
26,3	0,67	0,67	0,66	0,65
26,4	0,7	0,69	0,68	0,68
26,5	0,72	0,73	0,71	0,7
26,6	0,75	0,76	0,74	0,73
26,7	0,79	0,78	0,78	0,75
26,8	0,83	0,82	0,81	0,79
26,9	0,86	0,86	0,86	0,82
27	0,9	0,89	0,9	0,86
27,1	0,94	0,93	0,94	0,9
27,2	0,97	0,95	0,98	0,92
27,3	0,98	0,97	0,99	0,96
27,4	1	0,99	1	0,98
27,5	0,99	1	0,99	1
27,6	0,96	1	0,96	0,99
27,7	0,93	0,95	0,88	0,99
27,8	0,85	0,87	0,79	0,97
27,9	0,75	0,78	0,68	0,93
28	0,64	0,7	0,56	0,88
28,1	0,52	0,59	0,42	0,81
28,2	0,41	0,46	0,3	0,74
28,3	0,31	0,35	0,2	0,65
28,4	0,21	0,22	0,14	0,56
28,5	0,13	0,16	0,08	0,47
28,6	0,08	0,1	0,04	0,39
28,7	0,04	0,06	0,02	0,3

28,8	0,02	0,04	0,01	0,23
28,9	0,01	0,02	0	0,17
29	0,01	0,01	0	0,13
29,1	0	0	0	0,09
29,2	0	0	0	0,07
29,3	0	0	0	0,04
29,4	0	0	0	0,03
29,5	0	0	0	0,02
29,6	0	0	0	0,01
29,7	0	0	0	0,01
29,8	0	0	0	0
29,9	0	0	0	0
30	0	0	0	0
30,1	0	0	0	0
30,2	0	0	0	0
30,3	0	0	0	0
30,4	0	0	0	0
30,5	0	0	0	0
30,6	0	0	0	0
30,7	0	0	0	0
30,8	0	0	0	0
30,9	0	0	0	0
31	0	0	0	0
31,1	0	0	0	0
31,2	0	0	0	0
31,3	0	0	0	0
31,4	0	0	0	0
31,5	0	0	0	0
31,6	0	0	0	0
31,7	0	0	0	0

31,8	0	0	0	0
31,9	0	0	0	0
32	0	0	0	0

2.4 Rozkład energetyczny zadany histogramem

Tabela 2.5: Rozkład dawki na głębokości otrzymany za pomocą symulacji uwzględniającej wszystkie istotne elementy geometrii, oddziaływania. Rozkład energetyczny zadany histogramem. Głębokość uwzględnia przesunięcie o 0,6 mm spowodowane oddziaływaniem z przednią ścianą fantomu wodnego.

głębokość [mm]	Dawka względna	Odchylenie od pomiaru
0,7	0,19	0,03
0,8	0,19	0,03
0,9	0,2	0,02
1	0,2	0,02
1,1	0,2	0,02
1,2	0,2	0
1,3	0,2	0
1,4	0,2	0,01
1,5	0,2	0
1,6	0,2	0,01
1,7	0,2	0
1,8	0,2	0,02
1,9	0,2	0,02
2	0,2	0,03
2,1	0,2	0,03
2,2	0,2	0,02
2,3	0,2	0,01

2,4	0,21	0
2,5	0,21	0
2,6	0,2	0,02
2,7	0,2	0,02
2,8	0,2	0,01
2,9	0,2	0,02
3	0,2	0,02
3,1	0,2	0,01
3,2	0,2	0,02
3,3	0,2	0,01
3,4	0,2	0,02
3,5	0,21	0
3,6	0,21	0,01
3,7	0,21	0,01
3,8	0,21	0,01
3,9	0,21	0
4	0,21	0,01
4,1	0,21	0
4,2	0,21	0
4,3	0,22	0,02
4,4	0,21	0,01
4,5	0,21	0,01
4,6	0,21	0,01
4,7	0,21	0,01
4,8	0,21	0
4,9	0,21	0
5	0,21	0,01
5,1	0,21	0,01
5,2	0,22	0,01
5,3	0,21	0,01

5,4	0,21	0
5,5	0,21	0
5,6	0,21	0,01
5,7	0,21	0
5,8	0,22	0,01
5,9	0,22	0,01
6	0,22	0,03
6,1	0,22	0
6,2	0,22	0
6,3	0,22	0
6,4	0,22	0,01
6,5	0,22	0,01
6,6	0,22	0,01
6,7	0,22	0
6,8	0,22	0
6,9	0,22	0
7	0,22	0
7,1	0,22	0,01
7,2	0,22	0
7,3	0,22	0,02
7,4	0,22	0
7,5	0,22	0,01
7,6	0,22	0,01
7,7	0,22	0
7,8	0,23	0,02
7,9	0,22	0
8	0,22	0,01
8,1	0,22	0
8,2	0,22	0
8,3	0,23	0,02

8,4	0,23	0,01
8,5	0,22	0
8,6	0,23	0
8,7	0,23	0
8,8	0,23	0
8,9	0,23	0,01
9	0,23	0,01
9,1	0,23	0,01
9,2	0,23	0,02
9,3	0,23	0,02
9,4	0,23	0,03
9,5	0,23	0,02
9,6	0,24	0,03
9,7	0,23	0,02
9,8	0,24	0,02
9,9	0,23	0
10	0,23	0
10,1	0,24	0,02
10,2	0,23	0,01
10,3	0,24	0,01
10,4	0,24	0,01
10,5	0,24	0,01
10,6	0,24	0,01
10,7	0,24	0
10,8	0,24	0,01
10,9	0,24	0,02
11	0,24	0,04
11,1	0,25	0,04
11,2	0,25	0,04
11,3	0,24	0,01

11,4	0,24	0,01
11,5	0,24	0,01
11,6	0,24	0,01
11,7	0,24	0,02
11,8	0,24	0,01
11,9	0,24	0,01
12	0,25	0,03
12,1	0,25	0,02
12,2	0,25	0,01
12,3	0,25	0,02
12,4	0,25	0,02
12,5	0,25	0,02
12,6	0,25	0,03
12,7	0,25	0,02
12,8	0,25	0
12,9	0,25	0
13	0,25	0,02
13,1	0,26	0,04
13,2	0,25	0,01
13,3	0,25	0,01
13,4	0,25	0,01
13,5	0,25	0,01
13,6	0,25	0,01
13,7	0,26	0,02
13,8	0,26	0,02
13,9	0,26	0,03
14	0,26	0,02
14,1	0,25	0,01
14,2	0,26	0,01
14,3	0,26	0,01

14,4	0,26	0,02
14,5	0,26	0,01
14,6	0,26	0,02
14,7	0,26	0,02
14,8	0,26	0,02
14,9	0,26	0,02
15	0,26	0,02
15,1	0,26	0,01
15,2	0,27	0,02
15,3	0,27	0,02
15,4	0,27	0,01
15,5	0,27	0,01
15,6	0,26	0
15,7	0,27	0,01
15,8	0,27	0,01
15,9	0,27	0,02
16	0,27	0,01
16,1	0,27	0,02
16,2	0,28	0,03
16,3	0,28	0,03
16,4	0,27	0,01
16,5	0,28	0,02
16,6	0,28	0,02
16,7	0,28	0,04
16,8	0,28	0,02
16,9	0,28	0,01
17	0,28	0,01
17,1	0,28	0,01
17,2	0,28	0,02
17,3	0,28	0,02

17,4	0,28	0,02
17,5	0,29	0,03
17,6	0,29	0,02
17,7	0,28	0,01
17,8	0,28	0
17,9	0,28	0
18	0,29	0
18,1	0,29	0,01
18,2	0,29	0,02
18,3	0,29	0,01
18,4	0,29	0,01
18,5	0,3	0,02
18,6	0,29	0
18,7	0,3	0,02
18,8	0,3	0
18,9	0,3	0,01
19	0,3	0
19,1	0,3	0
19,2	0,3	0
19,3	0,3	0
19,4	0,3	0
19,5	0,31	0
19,6	0,3	0
19,7	0,31	0
19,8	0,31	0
19,9	0,31	0,01
20	0,31	0,01
20,1	0,31	0,01
20,2	0,32	0,01
20,3	0,32	0,02

20,4	0,32	0
20,5	0,32	0
20,6	0,32	0,02
20,7	0,33	0,02
20,8	0,32	0,01
20,9	0,32	0,01
21	0,33	0,01
21,1	0,33	0,01
21,2	0,33	0
21,3	0,33	0
21,4	0,33	0
21,5	0,33	0
21,6	0,34	0
21,7	0,34	0,01
21,8	0,34	0,01
21,9	0,35	0,02
22	0,35	0,01
22,1	0,35	0,01
22,2	0,35	0,01
22,3	0,36	0,01
22,4	0,36	0
22,5	0,36	0,01
22,6	0,36	0
22,7	0,37	0,01
22,8	0,37	0
22,9	0,37	0
23	0,37	0
23,1	0,38	0
23,2	0,38	0,01
23,3	0,38	0

23,4	0,38	0
23,5	0,39	0
23,6	0,4	0,01
23,7	0,39	0
23,8	0,4	0
23,9	0,41	0,01
24	0,4	0
24,1	0,41	0
24,2	0,42	0,01
24,3	0,42	0,01
24,4	0,43	0,01
24,5	0,43	0,01
24,6	0,44	0,02
24,7	0,44	0,01
24,8	0,45	0,02
24,9	0,45	0,02
25	0,45	0,02
25,1	0,46	0
25,2	0,46	0
25,3	0,47	0,01
25,4	0,47	0,01
25,5	0,48	0,01
25,6	0,49	0,01
25,7	0,49	0,01
25,8	0,5	0
25,9	0,51	0
26	0,52	0,01
26,1	0,53	0,01
26,2	0,53	0,02
26,3	0,55	0,01

26,4	0,56	0,02
26,5	0,57	0,01
26,6	0,58	0,02
26,7	0,6	0,02
26,8	0,62	0,01
26,9	0,64	0,01
27	0,66	0
27,1	0,68	0,01
27,2	0,7	0,01
27,3	0,72	0,02
27,4	0,76	0,01
27,5	0,79	0,02
27,6	0,82	0,01
27,7	0,87	0,01
27,8	0,91	0,01
27,9	0,95	0,01
28	0,99	0
28,1	1	0,01
28,2	0,99	0,01
28,3	0,94	0
28,4	0,85	0,02
28,5	0,74	0,01
28,6	0,61	0,01
28,7	0,49	0,01
28,8	0,34	0,05
28,9	0,23	0,05
29	0,13	0,13
29,1	0,07	0,1
29,2	0,04	0,01
29,3	0,02	0,09

29,4	0,01	0,05
------	------	------

2.5 Wiązka równoległa i wiązka rozbieżna

Tabela 2.6: Rozkład dawki na głębokości dla wiązki o rozkładzie energetycznym normalnym (energia średnia 60 MeV, odchylenie standardowe 0,2 MeV. Symulacje przeprowadzono dla wiązki równoległej i rozbieżnej.

Głębokość [mm]	Wiązka rozbieżna	Wiązka równoległa
0,1	0,16	0,16
0,2	0,16	0,16
0,3	0,16	0,16
0,4	0,16	0,16
0,5	0,16	0,16
0,6	0,16	0,16
0,7	0,17	0,16
0,8	0,16	0,16
0,9	0,16	0,16
1	0,16	0,16
1,1	0,16	0,16
1,2	0,16	0,16
1,3	0,16	0,16
1,4	0,16	0,17
1,5	0,16	0,16
1,6	0,16	0,16
1,7	0,16	0,16
1,8	0,16	0,16
1,9	0,16	0,16
2	0,16	0,16

2,1	0,16	0,16
2,2	0,16	0,17
2,3	0,16	0,16
2,4	0,16	0,17
2,5	0,16	0,17
2,6	0,16	0,17
2,7	0,17	0,17
2,8	0,16	0,17
2,9	0,16	0,17
3	0,17	0,16
3,1	0,17	0,17
3,2	0,17	0,16
3,3	0,17	0,17
3,4	0,16	0,17
3,5	0,17	0,17
3,6	0,16	0,17
3,7	0,17	0,17
3,8	0,16	0,17
3,9	0,17	0,17
4	0,17	0,17
4,1	0,17	0,17
4,2	0,17	0,17
4,3	0,17	0,17
4,4	0,17	0,17
4,5	0,17	0,17
4,6	0,17	0,17
4,7	0,17	0,17
4,8	0,17	0,17
4,9	0,17	0,17
5	0,17	0,17

5,1	0,17	0,17
5,2	0,17	0,17
5,3	0,17	0,17
5,4	0,17	0,17
5,5	0,17	0,18
5,6	0,17	0,17
5,7	0,17	0,18
5,8	0,17	0,18
5,9	0,17	0,18
6	0,18	0,18
6,1	0,18	0,18
6,2	0,18	0,18
6,3	0,18	0,18
6,4	0,17	0,18
6,5	0,19	0,18
6,6	0,18	0,18
6,7	0,18	0,18
6,8	0,18	0,18
6,9	0,18	0,18
7	0,19	0,18
7,1	0,17	0,18
7,2	0,18	0,18
7,3	0,18	0,18
7,4	0,17	0,18
7,5	0,18	0,18
7,6	0,18	0,18
7,7	0,18	0,18
7,8	0,18	0,18
7,9	0,18	0,18
8	0,18	0,18

8,1	0,18	0,18
8,2	0,18	0,18
8,3	0,18	0,18
8,4	0,18	0,18
8,5	0,18	0,18
8,6	0,18	0,18
8,7	0,18	0,18
8,8	0,18	0,19
8,9	0,19	0,19
9	0,18	0,19
9,1	0,18	0,19
9,2	0,18	0,19
9,3	0,18	0,19
9,4	0,18	0,19
9,5	0,18	0,19
9,6	0,18	0,18
9,7	0,18	0,19
9,8	0,19	0,19
9,9	0,19	0,19
10	0,18	0,19
10,1	0,18	0,19
10,2	0,19	0,19
10,3	0,19	0,19
10,4	0,19	0,19
10,5	0,19	0,19
10,6	0,19	0,19
10,7	0,19	0,19
10,8	0,19	0,19
10,9	0,19	0,19
11	0,19	0,19

11,1	0,19	0,2
11,2	0,19	0,19
11,3	0,19	0,19
11,4	0,2	0,19
11,5	0,2	0,2
11,6	0,19	0,19
11,7	0,19	0,2
11,8	0,19	0,2
11,9	0,19	0,2
12	0,19	0,2
12,1	0,19	0,2
12,2	0,19	0,2
12,3	0,19	0,2
12,4	0,19	0,2
12,5	0,2	0,2
12,6	0,19	0,2
12,7	0,2	0,2
12,8	0,2	0,2
12,9	0,2	0,2
13	0,2	0,21
13,1	0,2	0,21
13,2	0,2	0,21
13,3	0,2	0,2
13,4	0,2	0,21
13,5	0,2	0,21
13,6	0,2	0,21
13,7	0,2	0,21
13,8	0,2	0,21
13,9	0,21	0,21
14	0,2	0,21

14,1	0,2	0,21
14,2	0,21	0,21
14,3	0,21	0,21
14,4	0,21	0,21
14,5	0,21	0,21
14,6	0,21	0,22
14,7	0,21	0,22
14,8	0,21	0,21
14,9	0,22	0,22
15	0,22	0,22
15,1	0,22	0,21
15,2	0,22	0,22
15,3	0,21	0,22
15,4	0,22	0,22
15,5	0,22	0,22
15,6	0,22	0,22
15,7	0,23	0,22
15,8	0,22	0,22
15,9	0,21	0,22
16	0,21	0,22
16,1	0,22	0,22
16,2	0,23	0,23
16,3	0,22	0,22
16,4	0,22	0,22
16,5	0,22	0,23
16,6	0,22	0,23
16,7	0,22	0,23
16,8	0,23	0,23
16,9	0,23	0,23
17	0,23	0,23

17,1	0,22	0,23
17,2	0,23	0,23
17,3	0,23	0,24
17,4	0,23	0,24
17,5	0,23	0,24
17,6	0,23	0,24
17,7	0,23	0,24
17,8	0,23	0,24
17,9	0,23	0,24
18	0,23	0,24
18,1	0,23	0,24
18,2	0,24	0,25
18,3	0,24	0,24
18,4	0,24	0,24
18,5	0,24	0,24
18,6	0,24	0,25
18,7	0,24	0,25
18,8	0,24	0,25
18,9	0,24	0,25
19	0,24	0,25
19,1	0,25	0,25
19,2	0,25	0,26
19,3	0,25	0,26
19,4	0,25	0,26
19,5	0,25	0,26
19,6	0,25	0,26
19,7	0,25	0,26
19,8	0,25	0,26
19,9	0,25	0,26
20	0,26	0,26

20,1	0,26	0,26
20,2	0,26	0,26
20,3	0,26	0,27
20,4	0,26	0,27
20,5	0,26	0,27
20,6	0,26	0,27
20,7	0,27	0,27
20,8	0,27	0,27
20,9	0,27	0,28
21	0,27	0,28
21,1	0,27	0,28
21,2	0,28	0,28
21,3	0,27	0,28
21,4	0,27	0,29
21,5	0,28	0,29
21,6	0,28	0,29
21,7	0,28	0,29
21,8	0,28	0,3
21,9	0,29	0,29
22	0,28	0,29
22,1	0,29	0,3
22,2	0,29	0,3
22,3	0,29	0,3
22,4	0,29	0,3
22,5	0,3	0,3
22,6	0,3	0,3
22,7	0,3	0,31
22,8	0,3	0,31
22,9	0,3	0,31
23	0,31	0,32

23,1	0,31	0,32
23,2	0,31	0,32
23,3	0,32	0,32
23,4	0,32	0,32
23,5	0,32	0,33
23,6	0,32	0,33
23,7	0,32	0,33
23,8	0,33	0,34
23,9	0,33	0,34
24	0,34	0,34
24,1	0,33	0,35
24,2	0,35	0,35
24,3	0,34	0,35
24,4	0,35	0,36
24,5	0,35	0,36
24,6	0,36	0,36
24,7	0,36	0,37
24,8	0,36	0,37
24,9	0,37	0,38
25	0,38	0,39
25,1	0,38	0,39
25,2	0,38	0,39
25,3	0,39	0,4
25,4	0,39	0,4
25,5	0,4	0,4
25,6	0,4	0,41
25,7	0,41	0,42
25,8	0,41	0,43
25,9	0,42	0,43
26	0,43	0,45

26,1	0,44	0,45
26,2	0,44	0,46
26,3	0,45	0,47
26,4	0,46	0,48
26,5	0,47	0,48
26,6	0,48	0,49
26,7	0,49	0,5
26,8	0,5	0,52
26,9	0,52	0,53
27	0,53	0,54
27,1	0,54	0,56
27,2	0,57	0,58
27,3	0,58	0,6
27,4	0,61	0,62
27,5	0,64	0,65
27,6	0,67	0,68
27,7	0,71	0,71
27,8	0,73	0,75
27,9	0,77	0,77
28	0,82	0,84
28,1	0,87	0,89
28,2	0,94	0,95
28,3	0,97	1
28,4	1	0,97
28,5	0,99	0,94
28,6	0,9	0,96
28,7	0,83	0,88
28,8	0,65	0,79
28,9	0,54	0,64
29	0,47	0,54

29,1	0,41	0,39
29,2	0,26	0,27
29,3	0,18	0,17
29,4	0,12	0,11
29,5	0,06	0,08
29,6	0,04	0,04
29,7	0,02	0,02
29,8	0,01	0,01
29,9	0	0
30	0,01	0

2.6 Wpływ elementów stanowiska terapeutycznego na rozkłady dawki na głębokości.

Tabela 2.7: Rozkłady dawki na głębokości dla różnych wariantów geometrycznych programu symulacyjnego.

Głębokość [mm]	Elementy stanowiska terapeutycznego					
	próżnia	okienko kaptonowe	kolimator	komory jonizacyjne	powietrze	folia tantalowa
0,1	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
0,2	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
0,3	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
0,4	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
0,5	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
0,6	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
0,7	0,18	0,18	0,18	0,19	0,18	0,18
0,8	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18	0,18
0,9	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18	0,18
1	0,18	0,18	0,18	0,19	0,18	0,18

1,1	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18	0,18
1,2	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18	0,18
1,3	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18	0,18
1,4	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18	0,18
1,5	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18	0,18
1,6	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18	0,18
1,7	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18	0,18
1,8	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18	0,18
1,9	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18	0,18
2	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18	0,19
2,1	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18	0,19
2,2	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18	0,19
2,3	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,19
2,4	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,19
2,5	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
2,6	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
2,7	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
2,8	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
2,9	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
3	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
3,1	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
3,2	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
3,3	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
3,4	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
3,5	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
3,6	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
3,7	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
3,8	0,19	0,19	0,19	0,20	0,19	0,19
3,9	0,19	0,19	0,19	0,20	0,19	0,19
4	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19	0,19

4,1	0,19	0,19	0,19	0,20	0,19	0,19
4,2	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19	0,19
4,3	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19	0,19
4,4	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19	0,19
4,5	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19	0,19
4,6	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19	0,19
4,7	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19	0,19
4,8	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19	0,19
4,9	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19	0,19
5	0,20	0,20	0,20	0,20	0,19	0,20
5,1	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19	0,20
5,2	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19	0,20
5,3	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19	0,20
5,4	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19	0,20
5,5	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19	0,20
5,6	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19	0,20
5,7	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
5,8	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20
5,9	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
6	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
6,1	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
6,2	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
6,3	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
6,4	0,20	0,20	0,20	0,21	0,20	0,20
6,5	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
6,6	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
6,7	0,20	0,20	0,20	0,21	0,20	0,20
6,8	0,20	0,20	0,20	0,21	0,20	0,20
6,9	0,20	0,20	0,20	0,21	0,20	0,20
7	0,20	0,20	0,20	0,21	0,20	0,20

7,1	0,20	0,20	0,20	0,21	0,20	0,20
7,2	0,20	0,20	0,21	0,21	0,20	0,20
7,3	0,20	0,20	0,21	0,21	0,20	0,20
7,4	0,20	0,20	0,21	0,21	0,20	0,20
7,5	0,20	0,20	0,21	0,21	0,20	0,20
7,6	0,20	0,20	0,21	0,21	0,20	0,20
7,7	0,20	0,20	0,21	0,21	0,20	0,20
7,8	0,20	0,20	0,21	0,21	0,20	0,20
7,9	0,20	0,20	0,21	0,21	0,20	0,21
8	0,20	0,20	0,21	0,21	0,20	0,21
8,1	0,20	0,20	0,21	0,21	0,20	0,21
8,2	0,20	0,20	0,21	0,21	0,20	0,21
8,3	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,21
8,4	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,21
8,5	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
8,6	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21
8,7	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
8,8	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
8,9	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
9	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
9,1	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
9,2	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
9,3	0,21	0,21	0,21	0,22	0,21	0,21
9,4	0,21	0,21	0,22	0,22	0,21	0,21
9,5	0,21	0,21	0,22	0,22	0,21	0,21
9,6	0,21	0,21	0,22	0,22	0,21	0,21
9,7	0,21	0,21	0,22	0,22	0,21	0,21
9,8	0,21	0,21	0,22	0,22	0,21	0,21
9,9	0,21	0,21	0,22	0,22	0,21	0,21
10	0,21	0,21	0,22	0,22	0,21	0,21

10,1	0,21	0,21	0,22	0,22	0,21	0,21
10,2	0,21	0,21	0,22	0,22	0,21	0,21
10,3	0,21	0,21	0,22	0,22	0,21	0,21
10,4	0,21	0,21	0,22	0,22	0,21	0,21
10,5	0,21	0,21	0,22	0,22	0,21	0,22
10,6	0,21	0,21	0,22	0,22	0,21	0,22
10,7	0,21	0,21	0,22	0,22	0,21	0,22
10,8	0,21	0,21	0,22	0,22	0,21	0,22
10,9	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21	0,22
11	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
11,1	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
11,2	0,22	0,22	0,22	0,23	0,22	0,22
11,3	0,22	0,22	0,23	0,23	0,22	0,22
11,4	0,22	0,22	0,22	0,23	0,22	0,22
11,5	0,22	0,22	0,22	0,23	0,22	0,22
11,6	0,22	0,22	0,23	0,23	0,22	0,22
11,7	0,22	0,22	0,22	0,23	0,22	0,22
11,8	0,22	0,22	0,23	0,23	0,22	0,22
11,9	0,22	0,22	0,23	0,23	0,22	0,22
12	0,22	0,22	0,23	0,23	0,22	0,22
12,1	0,22	0,22	0,23	0,23	0,22	0,22
12,2	0,22	0,22	0,23	0,23	0,22	0,22
12,3	0,22	0,22	0,23	0,23	0,22	0,22
12,4	0,22	0,22	0,23	0,23	0,22	0,22
12,5	0,22	0,22	0,23	0,23	0,22	0,23
12,6	0,22	0,22	0,23	0,23	0,22	0,23
12,7	0,22	0,22	0,23	0,23	0,22	0,23
12,8	0,22	0,22	0,23	0,23	0,22	0,23
12,9	0,22	0,22	0,23	0,23	0,22	0,23
13	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23

13,1	0,23	0,23	0,23	0,24	0,23	0,23
13,2	0,23	0,23	0,23	0,24	0,23	0,23
13,3	0,23	0,23	0,23	0,24	0,23	0,23
13,4	0,23	0,23	0,23	0,24	0,23	0,23
13,5	0,23	0,23	0,23	0,24	0,23	0,23
13,6	0,23	0,23	0,23	0,24	0,23	0,23
13,7	0,23	0,23	0,23	0,24	0,23	0,23
13,8	0,23	0,23	0,23	0,24	0,23	0,23
13,9	0,23	0,23	0,24	0,24	0,23	0,23
14	0,23	0,23	0,24	0,24	0,23	0,23
14,1	0,23	0,23	0,24	0,24	0,23	0,23
14,2	0,23	0,23	0,24	0,24	0,23	0,23
14,3	0,23	0,23	0,24	0,24	0,23	0,23
14,4	0,23	0,23	0,24	0,24	0,23	0,24
14,5	0,23	0,23	0,24	0,24	0,23	0,24
14,6	0,23	0,23	0,24	0,24	0,23	0,24
14,7	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24
14,8	0,23	0,23	0,24	0,25	0,24	0,24
14,9	0,23	0,23	0,24	0,25	0,24	0,24
15	0,23	0,23	0,24	0,25	0,24	0,24
15,1	0,24	0,24	0,24	0,25	0,24	0,24
15,2	0,24	0,24	0,24	0,25	0,24	0,24
15,3	0,24	0,24	0,25	0,25	0,24	0,24
15,4	0,24	0,24	0,24	0,25	0,24	0,24
15,5	0,24	0,24	0,25	0,25	0,24	0,24
15,6	0,24	0,24	0,25	0,25	0,24	0,24
15,7	0,24	0,24	0,25	0,25	0,24	0,24
15,8	0,24	0,24	0,25	0,25	0,24	0,24
15,9	0,24	0,24	0,25	0,25	0,24	0,24
16	0,24	0,24	0,25	0,25	0,24	0,24

16,1	0,24	0,24	0,25	0,25	0,24	0,25
16,2	0,24	0,24	0,25	0,25	0,24	0,25
16,3	0,24	0,24	0,25	0,26	0,24	0,25
16,4	0,24	0,24	0,25	0,26	0,24	0,25
16,5	0,24	0,24	0,25	0,26	0,24	0,25
16,6	0,25	0,25	0,25	0,26	0,25	0,25
16,7	0,24	0,24	0,25	0,26	0,25	0,25
16,8	0,25	0,25	0,25	0,26	0,25	0,25
16,9	0,25	0,25	0,25	0,26	0,25	0,25
17	0,25	0,25	0,26	0,26	0,25	0,25
17,1	0,25	0,25	0,26	0,26	0,25	0,25
17,2	0,25	0,25	0,26	0,26	0,25	0,25
17,3	0,25	0,25	0,26	0,26	0,25	0,25
17,4	0,25	0,25	0,26	0,26	0,25	0,25
17,5	0,25	0,25	0,26	0,27	0,25	0,26
17,6	0,25	0,25	0,26	0,27	0,25	0,26
17,7	0,25	0,25	0,26	0,27	0,25	0,26
17,8	0,25	0,25	0,26	0,27	0,25	0,26
17,9	0,25	0,25	0,26	0,27	0,26	0,26
18	0,26	0,26	0,26	0,27	0,26	0,26
18,1	0,26	0,26	0,27	0,27	0,26	0,26
18,2	0,26	0,26	0,27	0,27	0,26	0,26
18,3	0,26	0,26	0,27	0,27	0,26	0,26
18,4	0,26	0,26	0,27	0,27	0,26	0,26
18,5	0,26	0,26	0,27	0,27	0,26	0,26
18,6	0,26	0,26	0,27	0,27	0,26	0,26
18,7	0,26	0,26	0,27	0,28	0,26	0,27
18,8	0,26	0,26	0,27	0,28	0,26	0,27
18,9	0,26	0,26	0,27	0,28	0,26	0,27
19	0,26	0,26	0,27	0,28	0,26	0,27

19,1	0,26	0,26	0,27	0,28	0,27	0,27
19,2	0,26	0,26	0,28	0,28	0,27	0,27
19,3	0,27	0,27	0,28	0,28	0,27	0,27
19,4	0,27	0,27	0,28	0,28	0,27	0,27
19,5	0,27	0,27	0,28	0,28	0,27	0,27
19,6	0,27	0,27	0,28	0,29	0,27	0,27
19,7	0,27	0,27	0,28	0,29	0,27	0,27
19,8	0,27	0,27	0,28	0,29	0,27	0,28
19,9	0,27	0,27	0,29	0,29	0,27	0,28
20	0,27	0,27	0,28	0,29	0,27	0,28
20,1	0,27	0,27	0,29	0,29	0,28	0,28
20,2	0,28	0,28	0,29	0,29	0,28	0,28
20,3	0,28	0,28	0,29	0,29	0,28	0,28
20,4	0,28	0,28	0,29	0,30	0,28	0,28
20,5	0,28	0,28	0,29	0,30	0,28	0,28
20,6	0,28	0,28	0,29	0,30	0,28	0,28
20,7	0,28	0,28	0,29	0,30	0,28	0,29
20,8	0,28	0,28	0,29	0,30	0,28	0,29
20,9	0,28	0,28	0,29	0,30	0,28	0,29
21	0,28	0,28	0,30	0,30	0,29	0,29
21,1	0,28	0,28	0,30	0,31	0,29	0,29
21,2	0,29	0,29	0,30	0,31	0,29	0,29
21,3	0,29	0,29	0,30	0,31	0,29	0,29
21,4	0,29	0,29	0,30	0,31	0,29	0,29
21,5	0,29	0,29	0,30	0,31	0,29	0,30
21,6	0,29	0,29	0,31	0,31	0,29	0,30
21,7	0,29	0,29	0,31	0,31	0,29	0,30
21,8	0,29	0,29	0,31	0,32	0,29	0,30
21,9	0,29	0,29	0,31	0,32	0,29	0,30
22	0,30	0,30	0,31	0,32	0,30	0,30

22,1	0,29	0,29	0,31	0,32	0,30	0,30
22,2	0,30	0,30	0,31	0,32	0,30	0,31
22,3	0,30	0,30	0,31	0,32	0,30	0,31
22,4	0,30	0,30	0,32	0,33	0,30	0,31
22,5	0,30	0,30	0,32	0,33	0,30	0,31
22,6	0,30	0,30	0,32	0,33	0,30	0,31
22,7	0,30	0,30	0,32	0,33	0,31	0,31
22,8	0,31	0,31	0,32	0,33	0,31	0,31
22,9	0,31	0,31	0,33	0,34	0,31	0,32
23	0,31	0,31	0,33	0,34	0,31	0,32
23,1	0,31	0,31	0,33	0,34	0,31	0,32
23,2	0,31	0,31	0,33	0,34	0,31	0,32
23,3	0,31	0,31	0,33	0,34	0,32	0,32
23,4	0,32	0,32	0,34	0,35	0,32	0,33
23,5	0,32	0,32	0,34	0,35	0,32	0,33
23,6	0,32	0,32	0,34	0,35	0,32	0,33
23,7	0,32	0,32	0,34	0,35	0,32	0,33
23,8	0,32	0,32	0,34	0,36	0,33	0,33
23,9	0,32	0,32	0,35	0,36	0,33	0,33
24	0,33	0,33	0,35	0,36	0,33	0,34
24,1	0,33	0,33	0,35	0,37	0,33	0,34
24,2	0,33	0,33	0,35	0,37	0,33	0,34
24,3	0,33	0,33	0,36	0,37	0,33	0,34
24,4	0,33	0,33	0,36	0,37	0,34	0,35
24,5	0,33	0,33	0,36	0,38	0,34	0,35
24,6	0,34	0,34	0,37	0,38	0,34	0,35
24,7	0,34	0,34	0,37	0,38	0,34	0,35
24,8	0,34	0,34	0,37	0,38	0,35	0,35
24,9	0,34	0,34	0,37	0,39	0,35	0,36
25	0,35	0,35	0,38	0,39	0,35	0,36

25,1	0,35	0,35	0,38	0,40	0,35	0,36
25,2	0,35	0,35	0,38	0,40	0,35	0,37
25,3	0,35	0,35	0,39	0,40	0,36	0,37
25,4	0,36	0,36	0,39	0,41	0,36	0,37
25,5	0,36	0,36	0,39	0,41	0,36	0,37
25,6	0,36	0,36	0,40	0,42	0,36	0,38
25,7	0,36	0,36	0,40	0,42	0,37	0,38
25,8	0,36	0,36	0,40	0,42	0,37	0,38
25,9	0,37	0,37	0,41	0,43	0,37	0,39
26	0,37	0,37	0,41	0,43	0,38	0,39
26,1	0,37	0,37	0,42	0,44	0,38	0,39
26,2	0,38	0,38	0,42	0,45	0,38	0,40
26,3	0,38	0,38	0,42	0,45	0,38	0,40
26,4	0,38	0,38	0,43	0,46	0,39	0,40
26,5	0,39	0,39	0,44	0,46	0,39	0,41
26,6	0,39	0,39	0,44	0,47	0,40	0,41
26,7	0,39	0,39	0,45	0,48	0,40	0,42
26,8	0,40	0,40	0,45	0,48	0,40	0,42
26,9	0,40	0,40	0,46	0,49	0,41	0,43
27	0,41	0,41	0,46	0,50	0,41	0,43
27,1	0,41	0,41	0,47	0,51	0,41	0,44
27,2	0,41	0,41	0,48	0,52	0,42	0,44
27,3	0,42	0,42	0,48	0,53	0,42	0,45
27,4	0,42	0,42	0,49	0,54	0,43	0,45
27,5	0,43	0,43	0,50	0,55	0,43	0,46
27,6	0,43	0,43	0,51	0,56	0,44	0,47
27,7	0,44	0,44	0,52	0,57	0,44	0,47
27,8	0,44	0,44	0,53	0,59	0,45	0,48
27,9	0,45	0,45	0,54	0,60	0,45	0,49
28	0,45	0,45	0,55	0,62	0,46	0,49

28,1	0,46	0,46	0,56	0,64	0,47	0,50
28,2	0,47	0,47	0,57	0,66	0,47	0,51
28,3	0,47	0,47	0,59	0,68	0,48	0,52
28,4	0,48	0,48	0,60	0,70	0,49	0,53
28,5	0,49	0,49	0,62	0,73	0,50	0,54
28,6	0,50	0,50	0,64	0,77	0,50	0,55
28,7	0,51	0,51	0,66	0,80	0,51	0,57
28,8	0,51	0,51	0,68	0,84	0,52	0,58
28,9	0,52	0,52	0,71	0,88	0,53	0,60
29	0,53	0,53	0,74	0,91	0,54	0,61
29,1	0,54	0,54	0,77	0,95	0,55	0,63
29,2	0,56	0,56	0,80	0,98	0,56	0,65
29,3	0,57	0,57	0,84	1,00	0,58	0,67
29,4	0,58	0,58	0,88	1,00	0,59	0,70
29,5	0,60	0,60	0,91	0,98	0,60	0,73
29,6	0,61	0,61	0,95	0,95	0,62	0,76
29,7	0,63	0,63	0,98	0,89	0,64	0,79
29,8	0,65	0,65	1,00	0,81	0,66	0,83
29,9	0,68	0,68	1,00	0,71	0,68	0,86
30	0,70	0,70	0,98	0,59	0,71	0,90
30,1	0,73	0,73	0,94	0,48	0,74	0,94
30,2	0,77	0,77	0,88	0,36	0,77	0,97
30,3	0,80	0,80	0,80	0,26	0,81	0,99
30,4	0,84	0,84	0,70	0,17	0,84	1,00
30,5	0,88	0,88	0,58	0,11	0,88	0,99
30,6	0,92	0,92	0,46	0,06	0,92	0,96
30,7	0,95	0,95	0,35	0,04	0,96	0,91
30,8	0,98	0,98	0,25	0,02	0,98	0,83
30,9	1,00	1,00	0,16	0,01	1,00	0,74
31	1,00	1,00	0,10	0,00	1,00	0,62

31,1	0,99	0,99	0,06	0,00	0,98	0,51
31,2	0,95	0,95	0,03	0,00	0,94	0,39
31,3	0,89	0,89	0,02	0,00	0,88	0,28
31,4	0,80	0,80	0,01	0,00	0,80	0,19
31,5	0,70	0,70	0,00	0,00	0,69	0,12
31,6	0,59	0,59	0,00	0,00	0,58	0,07
31,7	0,48	0,48	0,00	0,00	0,46	0,04
31,8	0,37	0,37	0,00	0,00	0,35	0,02
31,9	0,26	0,26	0,00	0,00	0,25	0,01
32	0,17	0,17	0,00	0,00	0,17	0,00
32,1	0,11	0,11	0,00	0,00	0,10	0,00
32,2	0,06	0,06	0,00	0,00	0,06	0,00
32,3	0,03	0,03	0,00	0,00	0,03	0,00
32,4	0,02	0,02	0,00	0,00	0,02	0,00
32,5	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
32,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
32,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
32,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
32,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
33	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

2.7 Symulacje rozkładu dawki na głębokości z uwzględnieniem reakcji jądrowych i bez.

Tabela 2.8: Porównanie głębokościowego rozkładu dawki dla dwóch wariantów oddziaływań fizycznych: z uwzględnieniem oddziaływań jądrowych oraz bez nich dla wiązki protonów o rozkładzie energetycznym opisanym histogramem.

Głębokość [mm]	Bez reakcji jądrowych	Z uwzględnieniem reakcji jądrowych
0,7	0,17	0,19
0,8	0,17	0,19
0,9	0,17	0,19
1	0,17	0,19
1,1	0,17	0,19
1,2	0,17	0,19
1,3	0,18	0,19
1,4	0,17	0,19
1,5	0,17	0,2
1,6	0,17	0,2
1,7	0,17	0,2
1,8	0,17	0,2
1,9	0,17	0,2
2	0,17	0,2
2,1	0,17	0,2
2,2	0,17	0,2
2,3	0,17	0,2
2,4	0,17	0,2
2,5	0,17	0,2
2,6	0,17	0,2
2,7	0,17	0,2

2,8	0,17	0,2
2,9	0,17	0,2
3	0,18	0,2
3,1	0,18	0,2
3,2	0,17	0,2
3,3	0,18	0,2
3,4	0,17	0,2
3,5	0,18	0,2
3,6	0,18	0,2
3,7	0,18	0,2
3,8	0,18	0,2
3,9	0,18	0,2
4	0,18	0,21
4,1	0,18	0,21
4,2	0,18	0,2
4,3	0,19	0,2
4,4	0,18	0,21
4,5	0,17	0,21
4,6	0,18	0,21
4,7	0,18	0,21
4,8	0,18	0,21
4,9	0,18	0,21
5	0,18	0,21
5,1	0,18	0,21
5,2	0,18	0,21
5,3	0,18	0,21
5,4	0,18	0,21
5,5	0,18	0,21
5,6	0,18	0,21
5,7	0,18	0,21

5,8	0,18	0,21
5,9	0,18	0,21
6	0,18	0,21
6,1	0,18	0,21
6,2	0,18	0,21
6,3	0,19	0,21
6,4	0,19	0,21
6,5	0,19	0,22
6,6	0,19	0,22
6,7	0,19	0,22
6,8	0,19	0,22
6,9	0,19	0,22
7	0,19	0,22
7,1	0,19	0,22
7,2	0,19	0,22
7,3	0,19	0,22
7,4	0,2	0,22
7,5	0,19	0,22
7,6	0,19	0,22
7,7	0,19	0,22
7,8	0,19	0,22
7,9	0,19	0,22
8	0,19	0,22
8,1	0,2	0,22
8,2	0,19	0,22
8,3	0,19	0,22
8,4	0,2	0,22
8,5	0,2	0,22
8,6	0,19	0,23
8,7	0,19	0,23

8,8	0,19	0,23
8,9	0,2	0,23
9	0,2	0,23
9,1	0,19	0,23
9,2	0,2	0,23
9,3	0,2	0,23
9,4	0,2	0,23
9,5	0,2	0,23
9,6	0,2	0,23
9,7	0,21	0,23
9,8	0,2	0,23
9,9	0,2	0,23
10	0,2	0,24
10,1	0,19	0,23
10,2	0,2	0,23
10,3	0,2	0,24
10,4	0,2	0,24
10,5	0,2	0,24
10,6	0,2	0,24
10,7	0,2	0,24
10,8	0,2	0,24
10,9	0,2	0,24
11	0,2	0,24
11,1	0,2	0,24
11,2	0,21	0,24
11,3	0,21	0,24
11,4	0,21	0,24
11,5	0,21	0,24
11,6	0,21	0,24
11,7	0,21	0,24

11,8	0,21	0,24
11,9	0,21	0,24
12	0,21	0,24
12,1	0,21	0,24
12,2	0,21	0,24
12,3	0,2	0,24
12,4	0,21	0,25
12,5	0,21	0,25
12,6	0,21	0,25
12,7	0,21	0,25
12,8	0,21	0,25
12,9	0,21	0,25
13	0,21	0,25
13,1	0,21	0,25
13,2	0,21	0,25
13,3	0,21	0,25
13,4	0,21	0,25
13,5	0,21	0,25
13,6	0,21	0,25
13,7	0,22	0,25
13,8	0,21	0,25
13,9	0,22	0,25
14	0,21	0,26
14,1	0,22	0,26
14,2	0,22	0,26
14,3	0,23	0,26
14,4	0,22	0,26
14,5	0,23	0,26
14,6	0,22	0,26
14,7	0,22	0,26

14,8	0,22	0,26
14,9	0,22	0,26
15	0,23	0,26
15,1	0,23	0,26
15,2	0,23	0,26
15,3	0,23	0,26
15,4	0,23	0,27
15,5	0,23	0,27
15,6	0,24	0,27
15,7	0,23	0,27
15,8	0,23	0,27
15,9	0,24	0,27
16	0,24	0,27
16,1	0,24	0,27
16,2	0,24	0,27
16,3	0,24	0,27
16,4	0,24	0,27
16,5	0,24	0,27
16,6	0,24	0,27
16,7	0,24	0,28
16,8	0,24	0,28
16,9	0,24	0,28
17	0,24	0,28
17,1	0,25	0,28
17,2	0,25	0,28
17,3	0,24	0,28
17,4	0,24	0,28
17,5	0,24	0,28
17,6	0,25	0,29
17,7	0,25	0,29

17,8	0,25	0,29
17,9	0,25	0,29
18	0,25	0,29
18,1	0,25	0,29
18,2	0,25	0,29
18,3	0,26	0,29
18,4	0,26	0,29
18,5	0,26	0,29
18,6	0,26	0,3
18,7	0,26	0,3
18,8	0,26	0,3
18,9	0,26	0,3
19	0,26	0,3
19,1	0,27	0,3
19,2	0,26	0,3
19,3	0,26	0,3
19,4	0,27	0,3
19,5	0,27	0,31
19,6	0,27	0,31
19,7	0,27	0,31
19,8	0,27	0,31
19,9	0,27	0,31
20	0,28	0,31
20,1	0,27	0,32
20,2	0,28	0,32
20,3	0,28	0,32
20,4	0,28	0,32
20,5	0,28	0,32
20,6	0,28	0,32
20,7	0,29	0,32

20,8	0,29	0,33
20,9	0,29	0,33
21	0,29	0,33
21,1	0,29	0,33
21,2	0,3	0,33
21,3	0,3	0,33
21,4	0,3	0,34
21,5	0,3	0,34
21,6	0,3	0,34
21,7	0,3	0,34
21,8	0,31	0,35
21,9	0,31	0,35
22	0,31	0,35
22,1	0,31	0,36
22,2	0,32	0,36
22,3	0,32	0,36
22,4	0,32	0,36
22,5	0,32	0,37
22,6	0,33	0,37
22,7	0,33	0,37
22,8	0,33	0,37
22,9	0,33	0,38
23	0,33	0,38
23,1	0,34	0,38
23,2	0,34	0,39
23,3	0,34	0,39
23,4	0,35	0,39
23,5	0,35	0,4
23,6	0,36	0,4
23,7	0,36	0,4

23,8	0,37	0,41
23,9	0,37	0,41
24	0,37	0,42
24,1	0,37	0,42
24,2	0,37	0,42
24,3	0,38	0,43
24,4	0,38	0,43
24,5	0,39	0,44
24,6	0,39	0,44
24,7	0,4	0,44
24,8	0,4	0,45
24,9	0,4	0,45
25	0,41	0,46
25,1	0,41	0,46
25,2	0,42	0,47
25,3	0,43	0,47
25,4	0,44	0,48
25,5	0,45	0,49
25,6	0,46	0,49
25,7	0,46	0,5
25,8	0,46	0,51
25,9	0,46	0,52
26	0,48	0,52
26,1	0,49	0,53
26,2	0,5	0,54
26,3	0,51	0,55
26,4	0,52	0,57
26,5	0,54	0,58
26,6	0,55	0,6
26,7	0,57	0,61

26,8	0,57	0,63
26,9	0,59	0,65
27	0,61	0,67
27,1	0,64	0,69
27,2	0,68	0,72
27,3	0,71	0,74
27,4	0,73	0,77
27,5	0,77	0,81
27,6	0,79	0,85
27,7	0,85	0,89
27,8	0,87	0,93
27,9	0,9	0,96
28	0,88	0,99
28,1	0,95	1
28,2	1	0,99
28,3	0,94	0,94
28,4	0,81	0,86
28,5	0,71	0,76
28,6	0,58	0,62
28,7	0,49	0,48
28,8	0,35	0,36
28,9	0,23	0,24
29	0,15	0,15
29,1	0,08	0,09
29,2	0,05	0,05
29,3	0,05	0,02
29,4	0,02	0,01
29,5	0,01	0
29,6	0,01	0
29,7	0	0

29,8	0	0
29,9	0	0
30	0	0
30,1	0	0
30,2	0	0
30,3	0	0
30,4	0	0
30,5	0	0
30,6	0	0
30,7	0	0
30,8	0	0
30,9	0	0
31	0	0

Rozdział 3

Symulacje profilu poprzecznego wiązki

3.1 Wpływ elementów stanowiska terapii protonowej na profil wiązki.

Tabela 3.1: Profile wiązki dla różnych wariantów geometrycznych programu symulacyjnego.

x [mm]	Elementy stanowiska terapeutycznego					
	próżnia	okienko kaptonowe	kolimator	komory jonizacyjne	powietrze	folia rozpraszająca
-49,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,7571
-48,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,7451
-47,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,7697
-46,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,7716
-45,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,8300
-44,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,7876
-43,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,7495
-42,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,7882

-41,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,8217
-40,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,8240
-39,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,7955
-38,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0003	0,8132
-37,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0003	0,8459
-36,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0003	0,9015
-35,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0003	0,8417
-34,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0004	0,8419
-33,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0004	0,8765
-32,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0004	0,8744
-31,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0005	0,8888
-30,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0006	0,9176
-29,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0008	0,9000
-28,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009	0,8789
-27,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0011	0,8879
-26,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0013	0,8783
-25,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0016	0,9411
-24,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0020	0,8740
-23,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0026	0,8907
-22,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0031	0,9437
-21,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0042	0,9318
-20,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0004	0,0049	0,9465
-19,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0006	0,0068	0,9598
-18,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0008	0,0091	0,9174
-17,5	0,0000	0,0001	0,0001	0,0010	0,0129	0,9021
-16,5	0,0000	0,0001	0,0001	0,0013	0,0181	0,8429
-15,5	0,0000	0,0001	0,0001	0,0018	0,0254	0,9245
-14,5	0,0000	0,0001	0,0001	0,0026	0,0365	0,9177
-13,5	0,0001	0,0002	0,0002	0,0039	0,0517	0,9597
-12,5	0,0001	0,0003	0,0003	0,0058	0,0749	0,9021

-11,5	0,0001	0,0004	0,0004	0,0099	0,1076	0,9224
-10,5	0,0002	0,0006	0,0006	0,0163	0,1499	1,0000
-9,5	0,0003	0,0009	0,0009	0,0287	0,2057	0,9481
-8,5	0,0005	0,0015	0,0015	0,0510	0,2764	0,9717
-7,5	0,0009	0,0024	0,0024	0,0904	0,3640	0,9988
-6,5	0,0016	0,0047	0,0047	0,1573	0,4648	0,9627
-5,5	0,0036	0,0103	0,0103	0,2573	0,5756	0,9759
-4,5	0,0095	0,0272	0,0272	0,3954	0,6892	0,9695
-3,5	0,0339	0,0981	0,0981	0,5730	0,7992	0,9377
-2,5	0,1476	0,3143	0,3143	0,7538	0,8935	0,9677
-1,5	0,5099	0,6793	0,6793	0,9079	0,9646	0,9456
-0,5	0,9991	1,0000	1,0000	1,0000	0,9968	0,9781
0,5	1,0000	0,9995	0,9995	0,9985	1,0000	0,9658
1,5	0,5096	0,6799	0,6799	0,9114	0,9651	0,9353
2,5	0,1477	0,3147	0,3147	0,7535	0,8937	0,9829
3,5	0,0339	0,0981	0,0981	0,5717	0,8005	0,9896
4,5	0,0096	0,0273	0,0273	0,3984	0,6911	0,9345
5,5	0,0036	0,0102	0,0102	0,2573	0,5791	0,9558
6,5	0,0017	0,0047	0,0047	0,1566	0,4652	0,9468
7,5	0,0009	0,0025	0,0025	0,0898	0,3652	0,9235
8,5	0,0005	0,0015	0,0015	0,0509	0,2794	0,9056
9,5	0,0003	0,0009	0,0009	0,0288	0,2063	0,9529
10,5	0,0002	0,0006	0,0006	0,0164	0,1496	0,9624
11,5	0,0001	0,0004	0,0004	0,0096	0,1059	0,9328
12,5	0,0001	0,0003	0,0003	0,0064	0,0743	0,9150
13,5	0,0001	0,0002	0,0002	0,0041	0,0523	0,9345
14,5	0,0001	0,0001	0,0001	0,0027	0,0367	0,8717
15,5	0,0000	0,0001	0,0001	0,0019	0,0253	0,9326
16,5	0,0000	0,0001	0,0001	0,0013	0,0182	0,9103
17,5	0,0000	0,0001	0,0001	0,0009	0,0130	0,9947

18,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0008	0,0093	0,9208
19,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0006	0,0068	0,8936
20,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0004	0,0053	0,9707
21,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0038	0,8733
22,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0028	0,9149
23,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0025	0,8647
24,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0019	0,9115
25,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0015	0,8671
26,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0013	0,8911
27,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0010	0,8664
28,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009	0,9117
29,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0008	0,8780
30,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0007	0,9123
31,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0006	0,8534
32,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0005	0,8366
33,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0004	0,8482
34,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0004	0,8844
35,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0004	0,8632
36,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,8434
37,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0003	0,8812
38,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,7580
39,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,8111
40,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,8358
41,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,7730
42,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,8424
43,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,7826
44,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,7791
45,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,7628
46,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,8023
47,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,7595

48,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,7731
49,5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001	0,7626

3.2 Profil wiązki uwzględniający wszystkie najważniejsze elementy geometryczne stanowiska terapii protonowej, w tym kolimator.

Tabela 3.2: Profil wiązki dla programu uwzględniającego opisane w pracy elementy geometryczne z uwzględnieniem kolimatora końcowego.

Odległość od osi wiązki [mm]	Dawka względna
0,5	0,96
1,5	0,95
2,5	0,96
3,5	0,96
4,5	0,97
5,5	0,96
6,5	0,95
7,5	0,93
8,5	0,99
9,5	0,96
10,5	0,93
11,5	0,97
12,5	0,97
13,5	0,96
14,5	0,96
15,5	0,97
16,5	0,91

17,5	0,92
18,5	0,85
19,5	0,70
20,5	0,10
21,5	0,00
22,5	0,00
23,5	0,00
24,5	0,00
25,5	0,00
26,5	0,00
27,5	0,00
28,5	0,00
29,5	0,00
30,5	0,00
31,5	0,01
32,5	0,25
33,5	0,53
34,5	0,65
35,5	0,81
36,5	0,85
37,5	0,84
38,5	0,87
39,5	0,83
40,5	0,81
41,5	0,83
42,5	0,79
43,5	0,82
44,5	0,78
45,5	0,78
46,5	0,76

47,5	0,72
48,5	0,73
49,5	0,72

Rozdział 4

Symulacje poszerzonego pik Bragga

4.1 Symulacje uproszczonego modulatora energii

4.1.1 Wiązka protonów o energii 50 MeV

Tabela 4.1: Symulacje komputerowe uproszczonego modulatora energii poszerzającego pik Bragga o 4 mm dla wiązki protonów o energii 50 MeV. W tabeli umieszczono energię zdeponowaną przez wiązkę protonów, która nie przeszła przez warstwę absorbenta, a także wiązki, które pokonały warstwę PMMA o grubości 0,5 h i h. W tabeli znajduje się także suma wiązek pomnożonych przez wagi, proporcjonalne do kątów rozwarcia wycinków walca oraz głębokościowy rozkład dawki względnej dla projektowanego modulatora.

Głębokość	Energia zdeponowana w poszczególnych detektorach [keV·10 ¹⁰]				Rozkład dawki względnej SOBP
	bez absorbenta	0,5 h	h	suma wiązek	
0,1	2,31	2,4	2,51	4,06	0,39
0,2	2,31	2,41	2,51	4,05	0,39
0,3	2,31	2,41	2,52	4,06	0,39
0,4	2,32	2,42	2,53	4,07	0,39

0,5	2,32	2,42	2,53	4,08	0,4
0,6	2,33	2,43	2,54	4,09	0,4
0,7	2,33	2,44	2,54	4,1	0,4
0,8	2,34	2,44	2,55	4,11	0,4
0,9	2,34	2,44	2,56	4,11	0,4
1	2,35	2,45	2,56	4,13	0,4
1,1	2,35	2,46	2,57	4,13	0,4
1,2	2,36	2,46	2,58	4,14	0,4
1,3	2,36	2,47	2,58	4,15	0,4
1,4	2,37	2,47	2,59	4,16	0,4
1,5	2,37	2,48	2,6	4,17	0,4
1,6	2,38	2,48	2,6	4,18	0,41
1,7	2,38	2,49	2,61	4,19	0,41
1,8	2,39	2,5	2,62	4,2	0,41
1,9	2,39	2,5	2,63	4,21	0,41
2	2,39	2,51	2,63	4,22	0,41
2,1	2,4	2,51	2,64	4,23	0,41
2,2	2,4	2,52	2,65	4,23	0,41
2,3	2,41	2,53	2,65	4,25	0,41
2,4	2,42	2,53	2,66	4,26	0,41
2,5	2,42	2,54	2,67	4,27	0,41
2,6	2,43	2,54	2,68	4,27	0,41
2,7	2,43	2,55	2,68	4,29	0,42
2,8	2,44	2,56	2,69	4,29	0,42
2,9	2,44	2,56	2,7	4,31	0,42
3	2,45	2,57	2,71	4,32	0,42
3,1	2,45	2,58	2,71	4,33	0,42
3,2	2,46	2,59	2,72	4,34	0,42
3,3	2,47	2,59	2,73	4,35	0,42
3,4	2,47	2,6	2,74	4,36	0,42

3,5	2,48	2,6	2,75	4,37	0,42
3,6	2,48	2,61	2,76	4,38	0,42
3,7	2,49	2,62	2,76	4,39	0,43
3,8	2,49	2,62	2,77	4,4	0,43
3,9	2,5	2,63	2,78	4,42	0,43
4	2,5	2,64	2,79	4,43	0,43
4,1	2,51	2,64	2,8	4,44	0,43
4,2	2,52	2,65	2,8	4,45	0,43
4,3	2,52	2,66	2,81	4,46	0,43
4,4	2,53	2,67	2,82	4,47	0,43
4,5	2,54	2,68	2,83	4,49	0,44
4,6	2,54	2,68	2,84	4,5	0,44
4,7	2,55	2,69	2,85	4,51	0,44
4,8	2,56	2,7	2,86	4,52	0,44
4,9	2,56	2,71	2,87	4,54	0,44
5	2,57	2,71	2,88	4,55	0,44
5,1	2,57	2,72	2,89	4,56	0,44
5,2	2,58	2,73	2,9	4,57	0,44
5,3	2,58	2,74	2,91	4,58	0,44
5,4	2,59	2,74	2,91	4,6	0,45
5,5	2,6	2,75	2,93	4,61	0,45
5,6	2,61	2,76	2,94	4,62	0,45
5,7	2,62	2,77	2,95	4,64	0,45
5,8	2,62	2,78	2,96	4,65	0,45
5,9	2,63	2,79	2,97	4,66	0,45
6	2,64	2,79	2,98	4,68	0,45
6,1	2,64	2,8	2,99	4,69	0,46
6,2	2,65	2,81	3	4,71	0,46
6,3	2,66	2,82	3,01	4,72	0,46
6,4	2,67	2,83	3,02	4,74	0,46

6,5	2,67	2,84	3,03	4,75	0,46
6,6	2,68	2,85	3,04	4,76	0,46
6,7	2,69	2,86	3,06	4,78	0,46
6,8	2,69	2,87	3,07	4,79	0,46
6,9	2,7	2,87	3,08	4,81	0,47
7	2,71	2,89	3,09	4,83	0,47
7,1	2,72	2,9	3,11	4,84	0,47
7,2	2,73	2,91	3,12	4,86	0,47
7,3	2,73	2,91	3,13	4,87	0,47
7,4	2,74	2,93	3,14	4,89	0,47
7,5	2,75	2,93	3,15	4,9	0,48
7,6	2,76	2,94	3,17	4,92	0,48
7,7	2,77	2,95	3,18	4,94	0,48
7,8	2,78	2,96	3,19	4,95	0,48
7,9	2,78	2,98	3,21	4,97	0,48
8	2,79	2,99	3,22	4,99	0,48
8,1	2,8	3	3,23	5,01	0,49
8,2	2,81	3,01	3,25	5,02	0,49
8,3	2,82	3,02	3,26	5,04	0,49
8,4	2,83	3,03	3,28	5,06	0,49
8,5	2,84	3,04	3,29	5,08	0,49
8,6	2,85	3,05	3,31	5,09	0,49
8,7	2,85	3,06	3,32	5,11	0,5
8,8	2,86	3,07	3,34	5,13	0,5
8,9	2,88	3,09	3,35	5,15	0,5
9	2,88	3,1	3,37	5,17	0,5
9,1	2,89	3,11	3,39	5,19	0,5
9,2	2,9	3,12	3,4	5,21	0,5
9,3	2,91	3,14	3,42	5,23	0,51
9,4	2,92	3,15	3,44	5,25	0,51

9,5	2,93	3,16	3,45	5,27	0,51
9,6	2,94	3,17	3,47	5,29	0,51
9,7	2,95	3,19	3,49	5,31	0,51
9,8	2,96	3,2	3,51	5,33	0,52
9,9	2,97	3,21	3,53	5,35	0,52
10	2,98	3,23	3,54	5,37	0,52
10,1	2,99	3,24	3,56	5,4	0,52
10,2	3	3,26	3,58	5,42	0,53
10,3	3,01	3,27	3,6	5,44	0,53
10,4	3,02	3,29	3,62	5,47	0,53
10,5	3,04	3,3	3,64	5,49	0,53
10,6	3,05	3,31	3,66	5,51	0,53
10,7	3,06	3,33	3,68	5,54	0,54
10,8	3,07	3,34	3,71	5,56	0,54
10,9	3,08	3,36	3,73	5,59	0,54
11	3,09	3,38	3,75	5,61	0,54
11,1	3,11	3,39	3,77	5,64	0,55
11,2	3,12	3,41	3,8	5,66	0,55
11,3	3,13	3,43	3,82	5,69	0,55
11,4	3,14	3,45	3,84	5,72	0,55
11,5	3,16	3,46	3,87	5,74	0,56
11,6	3,17	3,48	3,89	5,77	0,56
11,7	3,18	3,5	3,92	5,8	0,56
11,8	3,19	3,52	3,95	5,83	0,57
11,9	3,21	3,53	3,98	5,86	0,57
12	3,22	3,55	4	5,89	0,57
12,1	3,24	3,57	4,03	5,92	0,57
12,2	3,25	3,59	4,06	5,95	0,58
12,3	3,26	3,61	4,09	5,98	0,58
12,4	3,28	3,63	4,12	6,01	0,58

12,5	3,29	3,65	4,15	6,05	0,59
12,6	3,31	3,67	4,19	6,08	0,59
12,7	3,32	3,7	4,22	6,11	0,59
12,8	3,34	3,72	4,25	6,15	0,6
12,9	3,35	3,74	4,29	6,18	0,6
13	3,37	3,76	4,32	6,22	0,6
13,1	3,39	3,78	4,36	6,26	0,61
13,2	3,4	3,81	4,4	6,29	0,61
13,3	3,42	3,84	4,44	6,33	0,61
13,4	3,44	3,86	4,48	6,37	0,62
13,5	3,45	3,88	4,52	6,41	0,62
13,6	3,47	3,91	4,56	6,45	0,63
13,7	3,49	3,93	4,61	6,49	0,63
13,8	3,5	3,96	4,65	6,54	0,63
13,9	3,52	3,99	4,7	6,58	0,64
14	3,54	4,02	4,74	6,63	0,64
14,1	3,56	4,04	4,79	6,67	0,65
14,2	3,58	4,07	4,84	6,72	0,65
14,3	3,6	4,1	4,9	6,77	0,66
14,4	3,62	4,13	4,95	6,82	0,66
14,5	3,64	4,17	5,01	6,87	0,67
14,6	3,66	4,2	5,07	6,92	0,67
14,7	3,68	4,23	5,13	6,98	0,68
14,8	3,7	4,27	5,2	7,03	0,68
14,9	3,72	4,3	5,26	7,08	0,69
15	3,75	4,34	5,34	7,15	0,69
15,1	3,77	4,37	5,41	7,21	0,7
15,2	3,79	4,41	5,5	7,27	0,71
15,3	3,82	4,45	5,59	7,34	0,71
15,4	3,84	4,49	5,68	7,41	0,72

15,5	3,87	4,53	5,78	7,48	0,73
15,6	3,89	4,58	5,89	7,56	0,73
15,7	3,92	4,62	6	7,64	0,74
15,8	3,94	4,67	6,12	7,72	0,75
15,9	3,97	4,71	6,26	7,81	0,76
16	4	4,76	6,4	7,9	0,77
16,1	4,03	4,81	6,55	8	0,78
16,2	4,05	4,86	6,72	8,1	0,79
16,3	4,08	4,91	6,9	8,21	0,8
16,4	4,11	4,97	7,1	8,32	0,81
16,5	4,15	5,03	7,3	8,44	0,82
16,6	4,18	5,09	7,52	8,57	0,83
16,7	4,21	5,15	7,74	8,7	0,84
16,8	4,24	5,22	7,97	8,83	0,86
16,9	4,28	5,29	8,23	8,98	0,87
17	4,31	5,36	8,46	9,11	0,88
17,1	4,35	5,44	8,69	9,25	0,9
17,2	4,39	5,53	8,93	9,4	0,91
17,3	4,42	5,61	9,14	9,54	0,92
17,4	4,47	5,71	9,3	9,67	0,94
17,5	4,5	5,81	9,45	9,8	0,95
17,6	4,55	5,92	9,54	9,91	0,96
17,7	4,59	6,04	9,59	10	0,97
17,8	4,63	6,16	9,59	10,1	0,98
17,9	4,68	6,3	9,51	10,2	0,99
18	4,73	6,45	9,38	10,2	0,99
18,1	4,77	6,6	9,13	10,3	1
18,2	4,82	6,77	8,87	10,3	1
18,3	4,87	6,96	8,48	10,3	1
18,4	4,93	7,15	8,11	10,3	1

18,5	4,99	7,36	7,64	10,3	1
18,6	5,04	7,57	7,13	10,3	1
18,7	5,1	7,81	6,58	10,3	0,99
18,8	5,17	8,05	6,02	10,2	0,99
18,9	5,23	8,28	5,44	10,2	0,99
19	5,31	8,5	4,86	10,2	0,99
19,1	5,38	8,74	4,29	10,2	0,99
19,2	5,46	8,96	3,75	10,2	0,98
19,3	5,54	9,17	3,21	10,1	0,98
19,4	5,63	9,33	2,75	10,2	0,98
19,5	5,73	9,45	2,31	10,2	0,98
19,6	5,83	9,57	1,93	10,2	0,99
19,7	5,94	9,63	1,59	10,2	0,99
19,8	6,06	9,61	1,3	10,2	0,99
19,9	6,18	9,53	1,04	10,2	0,99
20	6,32	9,37	0,82	10,2	0,99
20,1	6,47	9,16	0,65	10,2	0,99
20,2	6,63	8,87	0,5	10,2	0,99
20,3	6,8	8,46	0,39	10,2	0,99
20,4	6,97	8,03	0,3	10,2	0,99
20,5	7,17	7,56	0,22	10,2	0,99
20,6	7,38	7,02	0,16	10,2	0,99
20,7	7,6	6,46	0,12	10,2	0,99
20,8	7,84	5,89	0,08	10,2	0,99
20,9	8,07	5,31	0,06	10,2	0,99
21	8,31	4,75	0,04	10,2	0,99
21,1	8,56	4,19	0,03	10,2	0,99
21,2	8,8	3,67	0,02	10,2	0,99
21,3	9,01	3,19	0,01	10,3	0,99
21,4	9,2	2,7	0,01	10,3	0,99

21,5	9,37	2,29	0,01	10,3	1
21,6	9,49	1,9	0	10,2	0,99
21,7	9,6	1,56	0	10,2	0,99
21,8	9,63	1,25	0	10,1	0,98
21,9	9,61	1,01	0	10	0,97
22	9,5	0,8	0	9,81	0,95
22,1	9,34	0,64	0	9,59	0,93
22,2	9,1	0,49	0	9,29	0,9
22,3	8,81	0,38	0	8,96	0,87
22,4	8,47	0,29	0	8,58	0,83
22,5	8,04	0,22	0	8,13	0,79
22,6	7,56	0,17	0	7,63	0,74
22,7	7,03	0,12	0	7,08	0,69
22,8	6,47	0,09	0	6,5	0,63
22,9	5,89	0,06	0	5,92	0,57
23	5,3	0,05	0	5,32	0,52
23,1	4,74	0,03	0	4,75	0,46
23,2	4,17	0,02	0	4,18	0,41
23,3	3,65	0,01	0	3,66	0,35
23,4	3,14	0,01	0	3,15	0,31
23,5	2,68	0,01	0	2,68	0,26
23,6	2,25	0	0	2,25	0,22
23,7	1,89	0	0	1,89	0,18
23,8	1,55	0	0	1,55	0,15
23,9	1,26	0	0	1,26	0,12
24	1,02	0	0	1,02	0,1
24,1	0,8	0	0	0,8	0,08
24,2	0,62	0	0	0,62	0,06
24,3	0,49	0	0	0,49	0,05
24,4	0,38	0	0	0,38	0,04

24,5	0,28	0	0	0,28	0,03
24,6	0,22	0	0	0,22	0,02
24,7	0,16	0	0	0,16	0,02
24,8	0,12	0	0	0,12	0,01
24,9	0,08	0	0	0,08	0,01
25	0,06	0	0	0,06	0,01
25,1	0,04	0	0	0,04	0
25,2	0,03	0	0	0,03	0
25,3	0,02	0	0	0,02	0
25,4	0,01	0	0	0,01	0
25,5	0,01	0	0	0,01	0
25,6	0,01	0	0	0,01	0
25,7	0	0	0	0	0
25,8	0	0	0	0	0
25,9	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0

4.1.2 Wiązka protonów o energii 55 MeV

Tabela 4.2: Symulacje komputerowe uproszczonego modulatora energii poszerzającego pik Bragga o 4 mm dla wiązki protonów o energii 55 MeV. W tabeli umieszczono energię zdeponowaną przez wiązkę protonów, która nie przeszła przez warstwę absorbenta, a także wiązki, które pokonały warstwę PMMA o grubości 0,5 h i h. W tabeli znajduje się także suma wiązek pomnożonych przez wagi, proporcjonalne do kątów rozwarcia wycinków walca oraz głębokościowy rozkład dawki względnej dla projektowanego modulatora.

Głębokość	Energia zdeponowana w poszczególnych detektorach [keV·10 ¹⁰]				Rozkład dawki względnej SOBP
	bez absorbenta	0,5 h	h	suma wiązek	
0,1	2,31	2,4	2,51	4,06	0,39
0,2	2,31	2,41	2,51	4,05	0,39
0,3	2,31	2,41	2,52	4,06	0,39
0,4	2,32	2,42	2,53	4,07	0,39
0,5	2,32	2,42	2,53	4,08	0,4
0,6	2,33	2,43	2,54	4,09	0,4
0,7	2,33	2,44	2,54	4,1	0,4
0,8	2,34	2,44	2,55	4,11	0,4
0,9	2,34	2,44	2,56	4,11	0,4
1	2,35	2,45	2,56	4,13	0,4
1,1	2,35	2,46	2,57	4,13	0,4
1,2	2,36	2,46	2,58	4,14	0,4
1,3	2,36	2,47	2,58	4,15	0,4
1,4	2,37	2,47	2,59	4,16	0,4
1,5	2,37	2,48	2,6	4,17	0,4
1,6	2,38	2,48	2,6	4,18	0,41
1,7	2,38	2,49	2,61	4,19	0,41
1,8	2,39	2,5	2,62	4,2	0,41
1,9	2,39	2,5	2,63	4,21	0,41

2	2,39	2,51	2,63	4,22	0,41
2,1	2,4	2,51	2,64	4,23	0,41
2,2	2,4	2,52	2,65	4,23	0,41
2,3	2,41	2,53	2,65	4,25	0,41
2,4	2,42	2,53	2,66	4,26	0,41
2,5	2,42	2,54	2,67	4,27	0,41
2,6	2,43	2,54	2,68	4,27	0,41
2,7	2,43	2,55	2,68	4,29	0,42
2,8	2,44	2,56	2,69	4,29	0,42
2,9	2,44	2,56	2,7	4,31	0,42
3	2,45	2,57	2,71	4,32	0,42
3,1	2,45	2,58	2,71	4,33	0,42
3,2	2,46	2,59	2,72	4,34	0,42
3,3	2,47	2,59	2,73	4,35	0,42
3,4	2,47	2,6	2,74	4,36	0,42
3,5	2,48	2,6	2,75	4,37	0,42
3,6	2,48	2,61	2,76	4,38	0,42
3,7	2,49	2,62	2,76	4,39	0,43
3,8	2,49	2,62	2,77	4,4	0,43
3,9	2,5	2,63	2,78	4,42	0,43
4	2,5	2,64	2,79	4,43	0,43
4,1	2,51	2,64	2,8	4,44	0,43
4,2	2,52	2,65	2,8	4,45	0,43
4,3	2,52	2,66	2,81	4,46	0,43
4,4	2,53	2,67	2,82	4,47	0,43
4,5	2,54	2,68	2,83	4,49	0,44
4,6	2,54	2,68	2,84	4,5	0,44
4,7	2,55	2,69	2,85	4,51	0,44
4,8	2,56	2,7	2,86	4,52	0,44
4,9	2,56	2,71	2,87	4,54	0,44

5	2,57	2,71	2,88	4,55	0,44
5,1	2,57	2,72	2,89	4,56	0,44
5,2	2,58	2,73	2,9	4,57	0,44
5,3	2,58	2,74	2,91	4,58	0,44
5,4	2,59	2,74	2,91	4,6	0,45
5,5	2,6	2,75	2,93	4,61	0,45
5,6	2,61	2,76	2,94	4,62	0,45
5,7	2,62	2,77	2,95	4,64	0,45
5,8	2,62	2,78	2,96	4,65	0,45
5,9	2,63	2,79	2,97	4,66	0,45
6	2,64	2,79	2,98	4,68	0,45
6,1	2,64	2,8	2,99	4,69	0,46
6,2	2,65	2,81	3	4,71	0,46
6,3	2,66	2,82	3,01	4,72	0,46
6,4	2,67	2,83	3,02	4,74	0,46
6,5	2,67	2,84	3,03	4,75	0,46
6,6	2,68	2,85	3,04	4,76	0,46
6,7	2,69	2,86	3,06	4,78	0,46
6,8	2,69	2,87	3,07	4,79	0,46
6,9	2,7	2,87	3,08	4,81	0,47
7	2,71	2,89	3,09	4,83	0,47
7,1	2,72	2,9	3,11	4,84	0,47
7,2	2,73	2,91	3,12	4,86	0,47
7,3	2,73	2,91	3,13	4,87	0,47
7,4	2,74	2,93	3,14	4,89	0,47
7,5	2,75	2,93	3,15	4,9	0,48
7,6	2,76	2,94	3,17	4,92	0,48
7,7	2,77	2,95	3,18	4,94	0,48
7,8	2,78	2,96	3,19	4,95	0,48
7,9	2,78	2,98	3,21	4,97	0,48

8	2,79	2,99	3,22	4,99	0,48
8,1	2,8	3	3,23	5,01	0,49
8,2	2,81	3,01	3,25	5,02	0,49
8,3	2,82	3,02	3,26	5,04	0,49
8,4	2,83	3,03	3,28	5,06	0,49
8,5	2,84	3,04	3,29	5,08	0,49
8,6	2,85	3,05	3,31	5,09	0,49
8,7	2,85	3,06	3,32	5,11	0,5
8,8	2,86	3,07	3,34	5,13	0,5
8,9	2,88	3,09	3,35	5,15	0,5
9	2,88	3,1	3,37	5,17	0,5
9,1	2,89	3,11	3,39	5,19	0,5
9,2	2,9	3,12	3,4	5,21	0,5
9,3	2,91	3,14	3,42	5,23	0,51
9,4	2,92	3,15	3,44	5,25	0,51
9,5	2,93	3,16	3,45	5,27	0,51
9,6	2,94	3,17	3,47	5,29	0,51
9,7	2,95	3,19	3,49	5,31	0,51
9,8	2,96	3,2	3,51	5,33	0,52
9,9	2,97	3,21	3,53	5,35	0,52
10	2,98	3,23	3,54	5,37	0,52
10,1	2,99	3,24	3,56	5,4	0,52
10,2	3	3,26	3,58	5,42	0,53
10,3	3,01	3,27	3,6	5,44	0,53
10,4	3,02	3,29	3,62	5,47	0,53
10,5	3,04	3,3	3,64	5,49	0,53
10,6	3,05	3,31	3,66	5,51	0,53
10,7	3,06	3,33	3,68	5,54	0,54
10,8	3,07	3,34	3,71	5,56	0,54
10,9	3,08	3,36	3,73	5,59	0,54

11	3,09	3,38	3,75	5,61	0,54
11,1	3,11	3,39	3,77	5,64	0,55
11,2	3,12	3,41	3,8	5,66	0,55
11,3	3,13	3,43	3,82	5,69	0,55
11,4	3,14	3,45	3,84	5,72	0,55
11,5	3,16	3,46	3,87	5,74	0,56
11,6	3,17	3,48	3,89	5,77	0,56
11,7	3,18	3,5	3,92	5,8	0,56
11,8	3,19	3,52	3,95	5,83	0,57
11,9	3,21	3,53	3,98	5,86	0,57
12	3,22	3,55	4	5,89	0,57
12,1	3,24	3,57	4,03	5,92	0,57
12,2	3,25	3,59	4,06	5,95	0,58
12,3	3,26	3,61	4,09	5,98	0,58
12,4	3,28	3,63	4,12	6,01	0,58
12,5	3,29	3,65	4,15	6,05	0,59
12,6	3,31	3,67	4,19	6,08	0,59
12,7	3,32	3,7	4,22	6,11	0,59
12,8	3,34	3,72	4,25	6,15	0,6
12,9	3,35	3,74	4,29	6,18	0,6
13	3,37	3,76	4,32	6,22	0,6
13,1	3,39	3,78	4,36	6,26	0,61
13,2	3,4	3,81	4,4	6,29	0,61
13,3	3,42	3,84	4,44	6,33	0,61
13,4	3,44	3,86	4,48	6,37	0,62
13,5	3,45	3,88	4,52	6,41	0,62
13,6	3,47	3,91	4,56	6,45	0,63
13,7	3,49	3,93	4,61	6,49	0,63
13,8	3,5	3,96	4,65	6,54	0,63
13,9	3,52	3,99	4,7	6,58	0,64

14	3,54	4,02	4,74	6,63	0,64
14,1	3,56	4,04	4,79	6,67	0,65
14,2	3,58	4,07	4,84	6,72	0,65
14,3	3,6	4,1	4,9	6,77	0,66
14,4	3,62	4,13	4,95	6,82	0,66
14,5	3,64	4,17	5,01	6,87	0,67
14,6	3,66	4,2	5,07	6,92	0,67
14,7	3,68	4,23	5,13	6,98	0,68
14,8	3,7	4,27	5,2	7,03	0,68
14,9	3,72	4,3	5,26	7,08	0,69
15	3,75	4,34	5,34	7,15	0,69
15,1	3,77	4,37	5,41	7,21	0,7
15,2	3,79	4,41	5,5	7,27	0,71
15,3	3,82	4,45	5,59	7,34	0,71
15,4	3,84	4,49	5,68	7,41	0,72
15,5	3,87	4,53	5,78	7,48	0,73
15,6	3,89	4,58	5,89	7,56	0,73
15,7	3,92	4,62	6	7,64	0,74
15,8	3,94	4,67	6,12	7,72	0,75
15,9	3,97	4,71	6,26	7,81	0,76
16	4	4,76	6,4	7,9	0,77
16,1	4,03	4,81	6,55	8	0,78
16,2	4,05	4,86	6,72	8,1	0,79
16,3	4,08	4,91	6,9	8,21	0,8
16,4	4,11	4,97	7,1	8,32	0,81
16,5	4,15	5,03	7,3	8,44	0,82
16,6	4,18	5,09	7,52	8,57	0,83
16,7	4,21	5,15	7,74	8,7	0,84
16,8	4,24	5,22	7,97	8,83	0,86
16,9	4,28	5,29	8,23	8,98	0,87

17	4,31	5,36	8,46	9,11	0,88
17,1	4,35	5,44	8,69	9,25	0,9
17,2	4,39	5,53	8,93	9,4	0,91
17,3	4,42	5,61	9,14	9,54	0,92
17,4	4,47	5,71	9,3	9,67	0,94
17,5	4,5	5,81	9,45	9,8	0,95
17,6	4,55	5,92	9,54	9,91	0,96
17,7	4,59	6,04	9,59	10	0,97
17,8	4,63	6,16	9,59	10,1	0,98
17,9	4,68	6,3	9,51	10,2	0,99
18	4,73	6,45	9,38	10,2	0,99
18,1	4,77	6,6	9,13	10,3	1
18,2	4,82	6,77	8,87	10,3	1
18,3	4,87	6,96	8,48	10,3	1
18,4	4,93	7,15	8,11	10,3	1
18,5	4,99	7,36	7,64	10,3	1
18,6	5,04	7,57	7,13	10,3	1
18,7	5,1	7,81	6,58	10,3	0,99
18,8	5,17	8,05	6,02	10,2	0,99
18,9	5,23	8,28	5,44	10,2	0,99
19	5,31	8,5	4,86	10,2	0,99
19,1	5,38	8,74	4,29	10,2	0,99
19,2	5,46	8,96	3,75	10,2	0,98
19,3	5,54	9,17	3,21	10,1	0,98
19,4	5,63	9,33	2,75	10,2	0,98
19,5	5,73	9,45	2,31	10,2	0,98
19,6	5,83	9,57	1,93	10,2	0,99
19,7	5,94	9,63	1,59	10,2	0,99
19,8	6,06	9,61	1,3	10,2	0,99
19,9	6,18	9,53	1,04	10,2	0,99

20	6,32	9,37	0,82	10,2	0,99
20,1	6,47	9,16	0,65	10,2	0,99
20,2	6,63	8,87	0,5	10,2	0,99
20,3	6,8	8,46	0,39	10,2	0,99
20,4	6,97	8,03	0,3	10,2	0,99
20,5	7,17	7,56	0,22	10,2	0,99
20,6	7,38	7,02	0,16	10,2	0,99
20,7	7,6	6,46	0,12	10,2	0,99
20,8	7,84	5,89	0,08	10,2	0,99
20,9	8,07	5,31	0,06	10,2	0,99
21	8,31	4,75	0,04	10,2	0,99
21,1	8,56	4,19	0,03	10,2	0,99
21,2	8,8	3,67	0,02	10,2	0,99
21,3	9,01	3,19	0,01	10,3	0,99
21,4	9,2	2,7	0,01	10,3	0,99
21,5	9,37	2,29	0,01	10,3	1
21,6	9,49	1,9	0	10,2	0,99
21,7	9,6	1,56	0	10,2	0,99
21,8	9,63	1,25	0	10,1	0,98
21,9	9,61	1,01	0	10	0,97
22	9,5	0,8	0	9,81	0,95
22,1	9,34	0,64	0	9,59	0,93
22,2	9,1	0,49	0	9,29	0,9
22,3	8,81	0,38	0	8,96	0,87
22,4	8,47	0,29	0	8,58	0,83
22,5	8,04	0,22	0	8,13	0,79
22,6	7,56	0,17	0	7,63	0,74
22,7	7,03	0,12	0	7,08	0,69
22,8	6,47	0,09	0	6,5	0,63
22,9	5,89	0,06	0	5,92	0,57

23	5,3	0,05	0	5,32	0,52
23,1	4,74	0,03	0	4,75	0,46
23,2	4,17	0,02	0	4,18	0,41
23,3	3,65	0,01	0	3,66	0,35
23,4	3,14	0,01	0	3,15	0,31
23,5	2,68	0,01	0	2,68	0,26
23,6	2,25	0	0	2,25	0,22
23,7	1,89	0	0	1,89	0,18
23,8	1,55	0	0	1,55	0,15
23,9	1,26	0	0	1,26	0,12
24	1,02	0	0	1,02	0,1
24,1	0,8	0	0	0,8	0,08
24,2	0,62	0	0	0,62	0,06
24,3	0,49	0	0	0,49	0,05
24,4	0,38	0	0	0,38	0,04
24,5	0,28	0	0	0,28	0,03
24,6	0,22	0	0	0,22	0,02
24,7	0,16	0	0	0,16	0,02
24,8	0,12	0	0	0,12	0,01
24,9	0,08	0	0	0,08	0,01
25	0,06	0	0	0,06	0,01
25,1	0,04	0	0	0,04	0
25,2	0,03	0	0	0,03	0
25,3	0,02	0	0	0,02	0
25,4	0,01	0	0	0,01	0
25,5	0,01	0	0	0,01	0
25,6	0,01	0	0	0,01	0
25,7	0	0	0	0	0
25,8	0	0	0	0	0
25,9	0	0	0	0	0

26	0	0	0	0	0
----	---	---	---	---	---

4.1.3 Wiązka protonów o energii 60 MeV

Tabela 4.3: Symulacje komputerowe uproszczonego modulatora energii poszerzającego pik Bragga o 4 mm dla wiązki protonów o energii 60 MeV. W tabeli umieszczono energię zdeponowaną przez wiązkę protonów, która nie przeszła przez warstwę absorbenta, a także wiązki, które pokonały warstwę PMMA o grubości 0,5 h i h. W tabeli znajduje się także suma wiązek pomnożonych przez wagi, proporcjonalne do kątów rozwarcia wycinków walca oraz głębokościowy rozkład dawki względnej dla projektowanego modulatora.

Głębokość	Energia zdeponowana w poszczególnych detektorach [keV·10 ¹⁰]				Rozkład dawki względnej SOBP
	bez absorbenta	0,5 h	h	suma wiązek	
0,1	1,99	2,06	2,12	3,39	0,34
0,2	2	2,06	2,12	3,4	0,34
0,3	2	2,07	2,13	3,41	0,34
0,4	2	2,07	2,13	3,41	0,34
0,5	2	2,07	2,14	3,41	0,34
0,6	2,01	2,08	2,14	3,42	0,34
0,7	2,01	2,08	2,14	3,42	0,34
0,8	2,01	2,08	2,15	3,43	0,34
0,9	2,02	2,08	2,15	3,44	0,34
1	2,02	2,09	2,15	3,44	0,34
1,1	2,02	2,09	2,16	3,45	0,34
1,2	2,02	2,1	2,16	3,45	0,34
1,3	2,03	2,1	2,16	3,46	0,34
1,4	2,03	2,1	2,17	3,46	0,34
1,5	2,03	2,1	2,17	3,47	0,34
1,6	2,03	2,11	2,17	3,47	0,34
1,7	2,04	2,11	2,18	3,48	0,35

1,8	2,04	2,12	2,18	3,48	0,35
1,9	2,04	2,12	2,19	3,49	0,35
2	2,05	2,12	2,19	3,5	0,35
2,1	2,05	2,12	2,19	3,5	0,35
2,2	2,05	2,13	2,2	3,5	0,35
2,3	2,06	2,13	2,2	3,51	0,35
2,4	2,06	2,13	2,21	3,52	0,35
2,5	2,06	2,14	2,21	3,52	0,35
2,6	2,07	2,14	2,21	3,53	0,35
2,7	2,07	2,15	2,21	3,53	0,35
2,8	2,07	2,15	2,22	3,54	0,35
2,9	2,08	2,15	2,22	3,55	0,35
3	2,08	2,16	2,23	3,55	0,35
3,1	2,08	2,16	2,23	3,56	0,35
3,2	2,09	2,16	2,23	3,56	0,35
3,3	2,09	2,17	2,24	3,57	0,35
3,4	2,09	2,17	2,24	3,57	0,35
3,5	2,09	2,17	2,25	3,58	0,36
3,6	2,1	2,18	2,25	3,58	0,36
3,7	2,1	2,18	2,25	3,59	0,36
3,8	2,11	2,18	2,26	3,6	0,36
3,9	2,11	2,19	2,27	3,61	0,36
4	2,11	2,19	2,27	3,61	0,36
4,1	2,12	2,2	2,27	3,62	0,36
4,2	2,12	2,2	2,28	3,62	0,36
4,3	2,12	2,21	2,28	3,63	0,36
4,4	2,13	2,21	2,29	3,63	0,36
4,5	2,13	2,21	2,29	3,64	0,36
4,6	2,13	2,22	2,29	3,65	0,36
4,7	2,14	2,22	2,3	3,65	0,36

4,8	2,14	2,22	2,3	3,66	0,36
4,9	2,14	2,23	2,31	3,67	0,36
5	2,15	2,23	2,31	3,67	0,37
5,1	2,15	2,24	2,32	3,68	0,37
5,2	2,16	2,24	2,32	3,69	0,37
5,3	2,16	2,24	2,33	3,69	0,37
5,4	2,16	2,25	2,33	3,7	0,37
5,5	2,17	2,25	2,34	3,71	0,37
5,6	2,17	2,26	2,34	3,71	0,37
5,7	2,17	2,26	2,35	3,72	0,37
5,8	2,18	2,27	2,35	3,72	0,37
5,9	2,18	2,27	2,36	3,73	0,37
6	2,19	2,27	2,36	3,74	0,37
6,1	2,19	2,28	2,37	3,75	0,37
6,2	2,19	2,28	2,37	3,75	0,37
6,3	2,2	2,29	2,38	3,76	0,37
6,4	2,2	2,29	2,38	3,77	0,37
6,5	2,2	2,3	2,39	3,77	0,38
6,6	2,21	2,3	2,39	3,78	0,37
6,7	2,21	2,31	2,39	3,79	0,38
6,8	2,22	2,31	2,4	3,8	0,38
6,9	2,22	2,32	2,41	3,8	0,38
7	2,22	2,32	2,41	3,81	0,38
7,1	2,23	2,32	2,41	3,82	0,38
7,2	2,23	2,33	2,42	3,83	0,38
7,3	2,24	2,33	2,43	3,83	0,38
7,4	2,24	2,34	2,43	3,84	0,38
7,5	2,25	2,34	2,44	3,85	0,38
7,6	2,25	2,35	2,44	3,86	0,38
7,7	2,25	2,35	2,45	3,87	0,38

7,8	2,26	2,36	2,45	3,87	0,38
7,9	2,26	2,36	2,46	3,88	0,39
8	2,26	2,37	2,47	3,89	0,39
8,1	2,27	2,37	2,47	3,89	0,39
8,2	2,27	2,38	2,48	3,9	0,39
8,3	2,28	2,38	2,48	3,91	0,39
8,4	2,28	2,39	2,49	3,92	0,39
8,5	2,29	2,39	2,49	3,93	0,39
8,6	2,29	2,4	2,5	3,94	0,39
8,7	2,3	2,4	2,51	3,94	0,39
8,8	2,3	2,4	2,51	3,95	0,39
8,9	2,31	2,41	2,52	3,96	0,39
9	2,31	2,42	2,52	3,97	0,39
9,1	2,31	2,42	2,53	3,98	0,39
9,2	2,32	2,43	2,54	3,99	0,4
9,3	2,32	2,43	2,54	4	0,4
9,4	2,33	2,44	2,55	4	0,4
9,5	2,33	2,44	2,56	4,01	0,4
9,6	2,34	2,45	2,56	4,02	0,4
9,7	2,34	2,45	2,57	4,03	0,4
9,8	2,35	2,46	2,57	4,04	0,4
9,9	2,35	2,47	2,58	4,05	0,4
10	2,36	2,47	2,59	4,06	0,4
10,1	2,36	2,48	2,6	4,06	0,4
10,2	2,37	2,48	2,6	4,07	0,4
10,3	2,37	2,49	2,61	4,08	0,4
10,4	2,38	2,49	2,62	4,09	0,41
10,5	2,38	2,5	2,62	4,1	0,41
10,6	2,39	2,5	2,63	4,11	0,41
10,7	2,39	2,51	2,64	4,12	0,41

10,8	2,4	2,52	2,64	4,13	0,41
10,9	2,4	2,52	2,65	4,14	0,41
11	2,41	2,53	2,66	4,15	0,41
11,1	2,41	2,54	2,67	4,16	0,41
11,2	2,42	2,54	2,67	4,17	0,41
11,3	2,42	2,55	2,68	4,18	0,41
11,4	2,43	2,55	2,69	4,19	0,42
11,5	2,43	2,56	2,69	4,2	0,42
11,6	2,44	2,57	2,7	4,21	0,42
11,7	2,45	2,58	2,71	4,22	0,42
11,8	2,45	2,58	2,72	4,23	0,42
11,9	2,46	2,59	2,73	4,24	0,42
12	2,46	2,59	2,73	4,25	0,42
12,1	2,47	2,6	2,74	4,26	0,42
12,2	2,47	2,61	2,75	4,27	0,42
12,3	2,48	2,61	2,76	4,29	0,43
12,4	2,49	2,62	2,76	4,29	0,43
12,5	2,49	2,63	2,77	4,3	0,43
12,6	2,5	2,64	2,78	4,31	0,43
12,7	2,5	2,64	2,79	4,33	0,43
12,8	2,51	2,65	2,8	4,34	0,43
12,9	2,52	2,65	2,81	4,35	0,43
13	2,52	2,67	2,82	4,36	0,43
13,1	2,53	2,67	2,83	4,37	0,43
13,2	2,53	2,68	2,84	4,39	0,44
13,3	2,54	2,68	2,85	4,4	0,44
13,4	2,55	2,7	2,85	4,41	0,44
13,5	2,56	2,7	2,86	4,42	0,44
13,6	2,56	2,71	2,87	4,43	0,44
13,7	2,57	2,72	2,89	4,45	0,44

13,8	2,57	2,72	2,89	4,46	0,44
13,9	2,58	2,73	2,9	4,47	0,44
14	2,59	2,74	2,91	4,48	0,44
14,1	2,59	2,75	2,92	4,5	0,45
14,2	2,6	2,76	2,93	4,51	0,45
14,3	2,61	2,76	2,95	4,52	0,45
14,4	2,61	2,77	2,95	4,53	0,45
14,5	2,62	2,78	2,96	4,55	0,45
14,6	2,63	2,79	2,97	4,56	0,45
14,7	2,63	2,8	2,98	4,58	0,45
14,8	2,64	2,81	2,99	4,59	0,46
14,9	2,65	2,82	3	4,6	0,46
15	2,66	2,82	3,02	4,62	0,46
15,1	2,66	2,83	3,03	4,63	0,46
15,2	2,67	2,84	3,04	4,64	0,46
15,3	2,68	2,85	3,05	4,66	0,46
15,4	2,69	2,86	3,06	4,68	0,46
15,5	2,69	2,87	3,07	4,69	0,47
15,6	2,7	2,88	3,09	4,7	0,47
15,7	2,71	2,89	3,1	4,72	0,47
15,8	2,71	2,9	3,11	4,73	0,47
15,9	2,72	2,91	3,12	4,75	0,47
16	2,73	2,92	3,13	4,77	0,47
16,1	2,74	2,93	3,15	4,78	0,47
16,2	2,75	2,94	3,16	4,8	0,48
16,3	2,76	2,95	3,18	4,81	0,48
16,4	2,76	2,96	3,19	4,83	0,48
16,5	2,77	2,97	3,2	4,85	0,48
16,6	2,78	2,98	3,21	4,86	0,48
16,7	2,79	2,99	3,23	4,88	0,48

16,8	2,8	3	3,24	4,9	0,49
16,9	2,81	3,01	3,26	4,91	0,49
17	2,82	3,02	3,27	4,93	0,49
17,1	2,82	3,03	3,28	4,95	0,49
17,2	2,83	3,04	3,3	4,97	0,49
17,3	2,84	3,06	3,31	4,98	0,49
17,4	2,86	3,07	3,33	5	0,5
17,5	2,86	3,08	3,34	5,02	0,5
17,6	2,87	3,09	3,36	5,04	0,5
17,7	2,88	3,1	3,37	5,06	0,5
17,8	2,89	3,12	3,39	5,08	0,5
17,9	2,9	3,13	3,41	5,09	0,5
18	2,91	3,14	3,42	5,12	0,51
18,1	2,92	3,15	3,44	5,13	0,51
18,2	2,93	3,16	3,46	5,16	0,51
18,3	2,94	3,18	3,47	5,17	0,51
18,4	2,95	3,19	3,5	5,2	0,52
18,5	2,96	3,2	3,51	5,21	0,52
18,6	2,97	3,22	3,53	5,24	0,52
18,7	2,98	3,23	3,55	5,26	0,52
18,8	2,99	3,25	3,57	5,29	0,52
18,9	3	3,26	3,59	5,3	0,53
19	3,01	3,27	3,61	5,33	0,53
19,1	3,02	3,29	3,63	5,35	0,53
19,2	3,04	3,31	3,65	5,37	0,53
19,3	3,04	3,32	3,67	5,39	0,54
19,4	3,06	3,33	3,69	5,42	0,54
19,5	3,07	3,35	3,71	5,44	0,54
19,6	3,08	3,36	3,73	5,47	0,54
19,7	3,09	3,38	3,76	5,5	0,54

19,8	3,1	3,4	3,78	5,52	0,55
19,9	3,12	3,42	3,8	5,55	0,55
20	3,13	3,43	3,83	5,57	0,55
20,1	3,14	3,45	3,85	5,6	0,56
20,2	3,16	3,47	3,88	5,63	0,56
20,3	3,17	3,48	3,9	5,66	0,56
20,4	3,18	3,5	3,93	5,68	0,57
20,5	3,2	3,52	3,96	5,71	0,57
20,6	3,21	3,54	3,99	5,74	0,57
20,7	3,22	3,55	4,01	5,77	0,57
20,8	3,24	3,58	4,04	5,8	0,58
20,9	3,25	3,6	4,07	5,83	0,58
21	3,26	3,61	4,1	5,86	0,58
21,1	3,28	3,64	4,13	5,89	0,58
21,2	3,29	3,66	4,16	5,92	0,59
21,3	3,31	3,68	4,2	5,96	0,59
21,4	3,32	3,7	4,23	5,99	0,59
21,5	3,34	3,72	4,26	6,03	0,6
21,6	3,36	3,74	4,3	6,06	0,6
21,7	3,37	3,77	4,34	6,1	0,61
21,8	3,39	3,79	4,37	6,14	0,61
21,9	3,4	3,81	4,41	6,17	0,61
22	3,42	3,84	4,45	6,21	0,62
22,1	3,44	3,86	4,49	6,25	0,62
22,2	3,46	3,89	4,53	6,29	0,63
22,3	3,47	3,91	4,58	6,33	0,63
22,4	3,49	3,94	4,62	6,37	0,63
22,5	3,51	3,97	4,67	6,42	0,64
22,6	3,53	4	4,71	6,46	0,64
22,7	3,55	4,02	4,76	6,51	0,65

22,8	3,56	4,05	4,81	6,55	0,65
22,9	3,59	4,08	4,87	6,6	0,66
23	3,61	4,11	4,92	6,65	0,66
23,1	3,62	4,14	4,98	6,7	0,66
23,2	3,64	4,17	5,04	6,75	0,67
23,3	3,67	4,21	5,1	6,81	0,68
23,4	3,69	4,24	5,17	6,86	0,68
23,5	3,71	4,27	5,24	6,92	0,69
23,6	3,73	4,31	5,32	6,98	0,69
23,7	3,75	4,35	5,39	7,04	0,7
23,8	3,78	4,38	5,48	7,11	0,71
23,9	3,8	4,42	5,57	7,18	0,71
24	3,83	4,46	5,66	7,25	0,72
24,1	3,85	4,5	5,76	7,32	0,73
24,2	3,88	4,54	5,87	7,4	0,73
24,3	3,9	4,59	5,99	7,48	0,74
24,4	3,93	4,63	6,11	7,57	0,75
24,5	3,96	4,68	6,24	7,65	0,76
24,6	3,98	4,73	6,38	7,75	0,77
24,7	4,01	4,77	6,52	7,84	0,78
24,8	4,04	4,83	6,68	7,94	0,79
24,9	4,07	4,88	6,84	8,05	0,8
25	4,1	4,94	7,01	8,16	0,81
25,1	4,13	4,99	7,2	8,27	0,82
25,2	4,17	5,06	7,39	8,39	0,83
25,3	4,2	5,12	7,58	8,51	0,84
25,4	4,23	5,19	7,76	8,63	0,86
25,5	4,27	5,25	7,95	8,76	0,87
25,6	4,3	5,33	8,14	8,88	0,88
25,7	4,34	5,41	8,3	9	0,89

25,8	4,37	5,49	8,45	9,12	0,9
25,9	4,41	5,58	8,6	9,24	0,92
26	4,45	5,68	8,71	9,34	0,93
26,1	4,49	5,78	8,83	9,46	0,94
26,2	4,53	5,88	8,88	9,56	0,95
26,3	4,58	6	8,93	9,65	0,96
26,4	4,62	6,12	8,9	9,72	0,96
26,5	4,67	6,26	8,82	9,79	0,97
26,6	4,72	6,39	8,75	9,85	0,97
26,7	4,77	6,54	8,57	9,88	0,98
26,8	4,82	6,69	8,37	9,91	0,98
26,9	4,87	6,86	8,13	9,92	0,98
27	4,93	7,04	7,86	9,94	0,98
27,1	4,98	7,23	7,51	9,93	0,98
27,2	5,05	7,41	7,15	9,92	0,98
27,3	5,11	7,61	6,76	9,91	0,98
27,4	5,18	7,81	6,33	9,88	0,98
27,5	5,25	7,97	5,91	9,85	0,98
27,6	5,32	8,15	5,44	9,81	0,97
27,7	5,41	8,32	4,99	9,78	0,97
27,8	5,49	8,5	4,55	9,76	0,97
27,9	5,58	8,64	4,14	9,75	0,97
28	5,67	8,75	3,72	9,72	0,96
28,1	5,77	8,84	3,28	9,69	0,96
28,2	5,88	8,9	2,88	9,68	0,96
28,3	5,99	8,94	2,51	9,67	0,96
28,4	6,12	8,92	2,18	9,67	0,96
28,5	6,26	8,85	1,88	9,68	0,96
28,6	6,4	8,75	1,6	9,69	0,96
28,7	6,55	8,58	1,36	9,69	0,96

28,8	6,71	8,38	1,13	9,71	0,96
28,9	6,87	8,15	0,93	9,73	0,97
29	7,04	7,84	0,77	9,75	0,97
29,1	7,23	7,53	0,63	9,79	0,97
29,2	7,41	7,17	0,51	9,82	0,97
29,3	7,6	6,75	0,41	9,84	0,98
29,4	7,8	6,33	0,33	9,88	0,98
29,5	7,98	5,9	0,26	9,9	0,99
29,6	8,17	5,45	0,22	9,94	0,99
29,7	8,33	4,98	0,17	9,94	1
29,8	8,49	4,52	0,12	9,94	1
29,9	8,64	4,07	0,09	9,93	1
30	8,74	3,64	0,07	9,89	0,99
30,1	8,83	3,22	0,05	9,85	0,98
30,2	8,88	2,84	0,04	9,78	0,99
30,3	8,89	2,47	0,03	9,67	0,97
30,4	8,87	2,14	0,02	9,54	0,96
30,5	8,81	1,83	0,01	9,38	0,95
30,6	8,71	1,56	0,01	9,2	0,94
30,7	8,52	1,32	0,01	8,93	0,9
30,8	8,34	1,1	0,01	8,68	0,88
30,9	8,09	0,92	0	8,38	0,83
31	7,78	0,77	0	8,02	0,79
31,1	7,44	0,63	0	7,64	0,74
31,2	7,09	0,5	0	7,25	0,71
31,3	6,66	0,4	0	6,78	0,65
31,4	6,26	0,32	0	6,36	0,61
31,5	5,8	0,25	0	5,88	0,57
31,6	5,35	0,2	0	5,41	0,52
31,7	4,88	0,16	0	4,93	0,48

31,8	4,41	0,12	0	4,45	0,43
31,9	3,97	0,09	0	4	0,4
32	3,55	0,07	0	3,57	0,35
32,1	3,16	0,05	0	3,18	0,3
32,2	2,77	0,04	0	2,78	0,27
32,3	2,4	0,03	0	2,41	0,23
32,4	2,07	0,02	0	2,08	0,2
32,5	1,79	0,01	0	1,79	0,17
32,6	1,51	0,01	0	1,51	0,15
32,7	1,28	0,01	0	1,28	0,13
32,8	1,07	0	0	1,08	0,11
32,9	0,9	0	0	0,9	0,09
33	0,75	0	0	0,75	0,07
33,1	0,6	0	0	0,6	0,06
33,2	0,5	0	0	0,5	0,04
33,3	0,41	0	0	0,41	0,04
33,4	0,32	0	0	0,32	0,03
33,5	0,25	0	0	0,26	0,02
33,6	0,2	0	0	0,2	0,01
33,7	0,15	0	0	0,15	0,01
33,8	0,12	0	0	0,12	0,01
33,9	0,09	0	0	0,09	0,01
34	0,07	0	0	0,07	0,01
34,1	0,05	0	0	0,05	0
34,2	0,04	0	0	0,04	0
34,3	0,03	0	0	0,03	0
34,4	0,02	0	0	0,02	0
34,5	0,01	0	0	0,01	0
34,6	0,01	0	0	0,01	0
34,7	0,01	0	0	0,01	0

34,8	0,01	0	0	0,01	0
34,9	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0

4.1.4 Wiązka protonów o energii 65 MeV

Tabela 4.4: Symulacje komputerowe uproszczonego modulatora energii poszerzającego pik Bragga o 4 mm dla wiązki protonów o energii 65 MeV. W tabeli umieszczono energię zdeponowaną przez wiązkę protonów, która nie przeszła przez warstwę absorbenta, a także wiązki, które pokonały warstwę PMMA o grubości 0,5 h i h. W tabeli znajduje się także suma wiązek pomnożonych przez wagi, proporcjonalne do kątów rozwarcia wycinków walca oraz głębokościowy rozkład dawki względnej dla projektowanego modulatora.

Głębokość	Energia zdeponowana w poszczególnych detektorach [keV·10 ¹⁰]				Rozkład dawki względnej SOBP
	bez absorbenta	0,5 h	h	suma wiązek	
0,1	1,88	1,92	1,97	3,13	0,32
0,2	1,88	1,92	1,97	3,13	0,32
0,3	1,88	1,93	1,98	3,13	0,32
0,4	1,88	1,93	1,98	3,14	0,32
0,5	1,89	1,93	1,98	3,14	0,32
0,6	1,89	1,93	1,99	3,15	0,32
0,7	1,89	1,94	1,99	3,15	0,33
0,8	1,89	1,94	1,99	3,16	0,33
0,9	1,90	1,94	1,99	3,16	0,33
1	1,90	1,94	1,99	3,16	0,33
1,1	1,90	1,95	2,00	3,17	0,33
1,2	1,90	1,95	2,00	3,17	0,33
1,3	1,91	1,95	2,01	3,18	0,33
1,4	1,91	1,95	2,01	3,18	0,33
1,5	1,91	1,96	2,01	3,18	0,33

1,6	1,91	1,96	2,01	3,19	0,33
1,7	1,91	1,96	2,01	3,19	0,33
1,8	1,92	1,96	2,02	3,2	0,33
1,9	1,92	1,97	2,02	3,2	0,33
2	1,92	1,97	2,03	3,21	0,33
2,1	1,93	1,97	2,03	3,21	0,33
2,2	1,93	1,98	2,03	3,21	0,33
2,3	1,93	1,98	2,03	3,21	0,33
2,4	1,93	1,98	2,04	3,22	0,33
2,5	1,93	1,98	2,04	3,22	0,33
2,6	1,94	1,98	2,04	3,23	0,33
2,7	1,94	1,99	2,05	3,24	0,33
2,8	1,94	1,99	2,05	3,24	0,33
2,9	1,94	1,99	2,05	3,24	0,33
3	1,95	2,00	2,06	3,25	0,33
3,1	1,95	2,00	2,06	3,25	0,34
3,2	1,95	2,00	2,06	3,26	0,34
3,3	1,96	2,00	2,07	3,26	0,34
3,4	1,96	2,01	2,07	3,27	0,34
3,5	1,96	2,01	2,07	3,27	0,34
3,6	1,97	2,01	2,08	3,28	0,34
3,7	1,97	2,02	2,07	3,28	0,34
3,8	1,97	2,02	2,08	3,28	0,34
3,9	1,97	2,02	2,09	3,29	0,34
4	1,97	2,02	2,09	3,29	0,34
4,1	1,98	2,03	2,09	3,3	0,34
4,2	1,98	2,03	2,09	3,31	0,34
4,3	1,98	2,04	2,09	3,31	0,34
4,4	1,99	2,04	2,10	3,31	0,34
4,5	1,99	2,04	2,10	3,32	0,34

4,6	1,99	2,04	2,11	3,32	0,34
4,7	1,99	2,05	2,11	3,33	0,34
4,8	2,00	2,05	2,11	3,33	0,34
4,9	2,00	2,05	2,12	3,34	0,34
5	2,00	2,06	2,12	3,34	0,35
5,1	2,00	2,06	2,12	3,35	0,35
5,2	2,00	2,06	2,13	3,35	0,35
5,3	2,01	2,07	2,13	3,36	0,35
5,4	2,01	2,07	2,13	3,36	0,35
5,5	2,02	2,07	2,14	3,37	0,35
5,6	2,02	2,07	2,14	3,37	0,35
5,7	2,02	2,08	2,14	3,38	0,35
5,8	2,02	2,08	2,15	3,38	0,35
5,9	2,03	2,09	2,15	3,39	0,35
6	2,03	2,09	2,16	3,39	0,35
6,1	2,04	2,09	2,16	3,4	0,35
6,2	2,04	2,09	2,16	3,4	0,35
6,3	2,04	2,10	2,16	3,41	0,35
6,4	2,04	2,10	2,17	3,41	0,35
6,5	2,04	2,10	2,17	3,42	0,35
6,6	2,05	2,11	2,18	3,43	0,35
6,7	2,05	2,11	2,18	3,43	0,35
6,8	2,05	2,11	2,18	3,43	0,35
6,9	2,06	2,12	2,19	3,44	0,36
7	2,06	2,12	2,19	3,45	0,36
7,1	2,07	2,12	2,19	3,45	0,36
7,2	2,07	2,13	2,20	3,46	0,36
7,3	2,07	2,13	2,20	3,46	0,36
7,4	2,07	2,14	2,21	3,47	0,36
7,5	2,08	2,14	2,21	3,47	0,36

7,6	2,08	2,14	2,22	3,48	0,36
7,7	2,08	2,15	2,22	3,48	0,36
7,8	2,09	2,15	2,22	3,49	0,36
7,9	2,09	2,15	2,23	3,5	0,36
8	2,09	2,16	2,23	3,5	0,36
8,1	2,10	2,16	2,24	3,51	0,36
8,2	2,10	2,17	2,24	3,51	0,36
8,3	2,10	2,17	2,25	3,52	0,36
8,4	2,11	2,17	2,25	3,53	0,36
8,5	2,11	2,17	2,25	3,53	0,36
8,6	2,11	2,18	2,26	3,53	0,36
8,7	2,12	2,18	2,26	3,54	0,37
8,8	2,12	2,19	2,26	3,55	0,37
8,9	2,12	2,19	2,27	3,55	0,37
9	2,13	2,19	2,27	3,56	0,37
9,1	2,13	2,20	2,28	3,57	0,37
9,2	2,13	2,20	2,28	3,57	0,37
9,3	2,13	2,21	2,29	3,58	0,37
9,4	2,14	2,21	2,29	3,59	0,37
9,5	2,14	2,21	2,30	3,59	0,37
9,6	2,15	2,22	2,30	3,6	0,37
9,7	2,15	2,22	2,31	3,6	0,37
9,8	2,16	2,23	2,31	3,61	0,37
9,9	2,16	2,23	2,31	3,62	0,37
10	2,16	2,23	2,32	3,63	0,37
10,1	2,16	2,24	2,32	3,63	0,37
10,2	2,17	2,24	2,33	3,64	0,37
10,3	2,17	2,25	2,33	3,64	0,38
10,4	2,18	2,25	2,33	3,65	0,38
10,5	2,18	2,25	2,34	3,66	0,38

10,6	2,18	2,26	2,35	3,66	0,38
10,7	2,19	2,26	2,35	3,67	0,38
10,8	2,19	2,27	2,35	3,68	0,38
10,9	2,20	2,27	2,36	3,68	0,38
11	2,20	2,28	2,36	3,69	0,38
11,1	2,20	2,28	2,37	3,69	0,38
11,2	2,21	2,28	2,38	3,71	0,38
11,3	2,21	2,29	2,38	3,71	0,38
11,4	2,22	2,29	2,39	3,72	0,38
11,5	2,22	2,30	2,39	3,73	0,38
11,6	2,22	2,30	2,40	3,73	0,39
11,7	2,23	2,31	2,40	3,74	0,39
11,8	2,23	2,31	2,41	3,74	0,39
11,9	2,24	2,32	2,41	3,75	0,39
12	2,24	2,32	2,42	3,76	0,39
12,1	2,25	2,32	2,42	3,77	0,39
12,2	2,25	2,33	2,43	3,78	0,39
12,3	2,25	2,33	2,43	3,78	0,39
12,4	2,26	2,34	2,44	3,79	0,39
12,5	2,26	2,34	2,44	3,8	0,39
12,6	2,27	2,35	2,45	3,81	0,39
12,7	2,27	2,35	2,46	3,82	0,39
12,8	2,27	2,36	2,46	3,82	0,39
12,9	2,28	2,36	2,47	3,83	0,4
13	2,28	2,37	2,47	3,84	0,4
13,1	2,29	2,37	2,48	3,85	0,4
13,2	2,29	2,38	2,48	3,85	0,4
13,3	2,29	2,38	2,49	3,86	0,4
13,4	2,30	2,39	2,50	3,87	0,4
13,5	2,30	2,39	2,50	3,88	0,4

13,6	2,31	2,40	2,51	3,88	0,4
13,7	2,31	2,40	2,51	3,89	0,4
13,8	2,32	2,41	2,52	3,9	0,4
13,9	2,32	2,41	2,52	3,91	0,4
14	2,33	2,42	2,53	3,92	0,4
14,1	2,33	2,42	2,54	3,93	0,41
14,2	2,34	2,43	2,54	3,94	0,41
14,3	2,34	2,44	2,55	3,94	0,41
14,4	2,35	2,44	2,56	3,95	0,41
14,5	2,35	2,45	2,56	3,96	0,41
14,6	2,36	2,45	2,57	3,97	0,41
14,7	2,36	2,46	2,58	3,98	0,41
14,8	2,37	2,46	2,58	3,99	0,41
14,9	2,37	2,47	2,59	4	0,41
15	2,38	2,47	2,60	4	0,41
15,1	2,38	2,48	2,60	4,02	0,41
15,2	2,38	2,49	2,61	4,02	0,42
15,3	2,39	2,49	2,62	4,03	0,42
15,4	2,40	2,50	2,62	4,04	0,42
15,5	2,40	2,50	2,63	4,05	0,42
15,6	2,40	2,51	2,64	4,06	0,42
15,7	2,41	2,52	2,64	4,07	0,42
15,8	2,42	2,52	2,65	4,08	0,42
15,9	2,42	2,53	2,66	4,09	0,42
16	2,43	2,53	2,66	4,1	0,42
16,1	2,43	2,54	2,67	4,11	0,42
16,2	2,44	2,54	2,68	4,12	0,43
16,3	2,44	2,55	2,69	4,13	0,43
16,4	2,45	2,56	2,69	4,14	0,43
16,5	2,45	2,57	2,70	4,15	0,43

16,6	2,46	2,57	2,71	4,16	0,43
16,7	2,46	2,58	2,72	4,17	0,43
16,8	2,47	2,59	2,73	4,18	0,43
16,9	2,48	2,59	2,73	4,19	0,43
17	2,48	2,60	2,74	4,2	0,43
17,1	2,49	2,61	2,75	4,21	0,43
17,2	2,50	2,61	2,76	4,22	0,44
17,3	2,50	2,62	2,76	4,23	0,44
17,4	2,51	2,63	2,78	4,24	0,44
17,5	2,51	2,63	2,78	4,25	0,44
17,6	2,52	2,64	2,79	4,27	0,44
17,7	2,52	2,65	2,80	4,28	0,44
17,8	2,53	2,65	2,81	4,28	0,44
17,9	2,54	2,66	2,82	4,3	0,44
18	2,54	2,67	2,83	4,31	0,44
18,1	2,55	2,68	2,84	4,32	0,45
18,2	2,55	2,68	2,85	4,33	0,45
18,3	2,56	2,69	2,85	4,34	0,45
18,4	2,57	2,70	2,86	4,36	0,45
18,5	2,57	2,71	2,87	4,37	0,45
18,6	2,58	2,72	2,88	4,38	0,45
18,7	2,59	2,72	2,89	4,4	0,45
18,8	2,60	2,73	2,90	4,41	0,46
18,9	2,60	2,74	2,91	4,42	0,46
19	2,61	2,75	2,92	4,43	0,46
19,1	2,61	2,75	2,93	4,44	0,46
19,2	2,62	2,76	2,94	4,46	0,46
19,3	2,63	2,77	2,95	4,47	0,46
19,4	2,64	2,78	2,96	4,49	0,46
19,5	2,64	2,79	2,97	4,49	0,46

19,6	2,65	2,80	2,98	4,51	0,47
19,7	2,66	2,81	2,99	4,52	0,47
19,8	2,66	2,82	3,01	4,54	0,47
19,9	2,67	2,82	3,02	4,55	0,47
20	2,68	2,83	3,03	4,57	0,47
20,1	2,69	2,84	3,04	4,58	0,47
20,2	2,69	2,85	3,05	4,59	0,47
20,3	2,70	2,86	3,06	4,61	0,48
20,4	2,71	2,87	3,07	4,62	0,48
20,5	2,72	2,88	3,08	4,64	0,48
20,6	2,73	2,89	3,10	4,65	0,48
20,7	2,73	2,90	3,11	4,67	0,48
20,8	2,74	2,91	3,12	4,68	0,48
20,9	2,75	2,92	3,13	4,7	0,49
21	2,76	2,93	3,15	4,71	0,49
21,1	2,77	2,94	3,16	4,73	0,49
21,2	2,78	2,95	3,17	4,75	0,49
21,3	2,78	2,96	3,19	4,76	0,49
21,4	2,79	2,97	3,20	4,78	0,49
21,5	2,80	2,98	3,21	4,79	0,5
21,6	2,81	2,99	3,22	4,81	0,5
21,7	2,82	3,00	3,24	4,83	0,5
21,8	2,83	3,01	3,25	4,84	0,5
21,9	2,83	3,02	3,27	4,86	0,5
22	2,84	3,03	3,28	4,88	0,5
22,1	2,85	3,04	3,30	4,9	0,51
22,2	2,86	3,06	3,31	4,91	0,51
22,3	2,87	3,07	3,33	4,93	0,51
22,4	2,88	3,08	3,34	4,95	0,51
22,5	2,89	3,09	3,36	4,97	0,51

22,6	2,90	3,10	3,38	4,99	0,52
22,7	2,91	3,11	3,39	5,01	0,52
22,8	2,92	3,13	3,41	5,03	0,52
22,9	2,93	3,14	3,42	5,05	0,52
23	2,94	3,15	3,44	5,07	0,52
23,1	2,95	3,17	3,46	5,08	0,53
23,2	2,96	3,18	3,48	5,11	0,53
23,3	2,97	3,19	3,50	5,13	0,53
23,4	2,98	3,21	3,51	5,15	0,53
23,5	2,99	3,22	3,53	5,17	0,53
23,6	3,00	3,23	3,55	5,19	0,54
23,7	3,01	3,25	3,57	5,21	0,54
23,8	3,02	3,26	3,59	5,23	0,54
23,9	3,03	3,27	3,61	5,25	0,54
24	3,04	3,29	3,63	5,28	0,55
24,1	3,06	3,31	3,65	5,3	0,55
24,2	3,07	3,32	3,67	5,33	0,55
24,3	3,08	3,34	3,70	5,35	0,55
24,4	3,09	3,35	3,72	5,38	0,56
24,5	3,10	3,37	3,74	5,4	0,56
24,6	3,12	3,38	3,76	5,42	0,56
24,7	3,13	3,40	3,78	5,45	0,56
24,8	3,14	3,42	3,81	5,47	0,57
24,9	3,15	3,43	3,83	5,5	0,57
25	3,17	3,45	3,86	5,53	0,57
25,1	3,18	3,47	3,88	5,55	0,57
25,2	3,19	3,49	3,91	5,58	0,58
25,3	3,21	3,51	3,94	5,61	0,58
25,4	3,22	3,53	3,96	5,64	0,58
25,5	3,23	3,54	3,99	5,67	0,59

25,6	3,25	3,56	4,02	5,7	0,59
25,7	3,26	3,58	4,05	5,73	0,59
25,8	3,28	3,60	4,08	5,76	0,6
25,9	3,29	3,62	4,11	5,79	0,6
26	3,30	3,64	4,14	5,82	0,6
26,1	3,32	3,66	4,17	5,85	0,61
26,2	3,34	3,69	4,21	5,89	0,61
26,3	3,35	3,71	4,24	5,92	0,61
26,4	3,37	3,73	4,27	5,96	0,62
26,5	3,38	3,75	4,31	5,99	0,62
26,6	3,40	3,77	4,35	6,03	0,62
26,7	3,41	3,80	4,38	6,06	0,63
26,8	3,43	3,82	4,42	6,11	0,63
26,9	3,45	3,85	4,46	6,14	0,64
27	3,47	3,87	4,50	6,18	0,64
27,1	3,49	3,90	4,55	6,22	0,64
27,2	3,50	3,92	4,59	6,26	0,65
27,3	3,52	3,95	4,64	6,31	0,65
27,4	3,54	3,98	4,68	6,35	0,66
27,5	3,56	4,01	4,73	6,4	0,66
27,6	3,58	4,04	4,78	6,44	0,67
27,7	3,60	4,06	4,84	6,49	0,67
27,8	3,62	4,10	4,89	6,54	0,68
27,9	3,64	4,13	4,95	6,59	0,68
28	3,66	4,16	5,01	6,64	0,69
28,1	3,68	4,19	5,07	6,69	0,7
28,2	3,70	4,22	5,14	6,75	0,7
28,3	3,72	4,26	5,21	6,81	0,71
28,4	3,74	4,29	5,28	6,86	0,71
28,5	3,77	4,33	5,36	6,93	0,72

28,6	3,79	4,37	5,44	6,99	0,73
28,7	3,82	4,40	5,53	7,06	0,73
28,8	3,84	4,45	5,63	7,13	0,74
28,9	3,86	4,48	5,72	7,2	0,75
29	3,89	4,52	5,83	7,27	0,76
29,1	3,92	4,57	5,94	7,35	0,77
29,2	3,94	4,61	6,06	7,44	0,77
29,3	3,97	4,66	6,19	7,52	0,78
29,4	3,99	4,71	6,32	7,61	0,79
29,5	4,02	4,76	6,46	7,71	0,8
29,6	4,05	4,81	6,61	7,8	0,81
29,7	4,08	4,86	6,76	7,91	0,82
29,8	4,11	4,92	6,93	8,01	0,84
29,9	4,14	4,97	7,09	8,12	0,85
30	4,18	5,04	7,26	8,23	0,86
30,1	4,21	5,10	7,43	8,35	0,87
30,2	4,24	5,17	7,60	8,46	0,88
30,3	4,28	5,24	7,75	8,57	0,9
30,4	4,31	5,32	7,94	8,7	0,91
30,5	4,35	5,40	8,09	8,81	0,92
30,6	4,39	5,48	8,24	8,93	0,93
30,7	4,43	5,57	8,36	9,04	0,94
30,8	4,47	5,67	8,46	9,14	0,95
30,9	4,51	5,77	8,54	9,24	0,96
31	4,55	5,88	8,61	9,33	0,97
31,1	4,59	5,99	8,64	9,42	0,98
31,2	4,64	6,12	8,63	9,5	0,98
31,3	4,69	6,25	8,57	9,55	0,99
31,4	4,73	6,39	8,49	9,61	0,99
31,5	4,78	6,53	8,36	9,65	1

31,6	4,84	6,68	8,19	9,68	1
31,7	4,89	6,84	8,00	9,7	1
31,8	4,95	7,01	7,75	9,71	1
31,9	5,01	7,17	7,48	9,71	1
32	5,07	7,34	7,16	9,7	1
32,1	5,14	7,52	6,84	9,69	1
32,2	5,20	7,68	6,50	9,68	0,99
32,3	5,28	7,86	6,11	9,65	0,99
32,4	5,35	8,03	5,70	9,62	0,99
32,5	5,43	8,18	5,27	9,57	0,98
32,6	5,52	8,31	4,84	9,54	0,98
32,7	5,61	8,43	4,44	9,51	0,98
32,8	5,71	8,52	4,04	9,48	0,97
32,9	5,81	8,60	3,65	9,46	0,97
33	5,93	8,64	3,28	9,45	0,97
33,1	6,04	8,65	2,93	9,43	0,97
33,2	6,17	8,63	2,59	9,43	0,97
33,3	6,30	8,58	2,28	9,43	0,97
33,4	6,44	8,47	2,01	9,44	0,97
33,5	6,59	8,33	1,74	9,45	0,97
33,6	6,74	8,13	1,49	9,45	0,98
33,7	6,90	7,90	1,26	9,47	0,98
33,8	7,07	7,64	1,08	9,5	0,98
33,9	7,24	7,36	0,89	9,52	0,98
34	7,40	7,03	0,74	9,54	0,99
34,1	7,58	6,70	0,61	9,59	0,99
34,2	7,75	6,34	0,50	9,62	0,99
34,3	7,93	5,96	0,41	9,66	1
34,4	8,09	5,53	0,33	9,68	1
34,5	8,23	5,13	0,28	9,7	1

34,6	8,36	4,71	0,22	9,69	0,99
34,7	8,45	4,30	0,17	9,65	0,99
34,8	8,54	3,89	0,13	9,62	0,99
34,9	8,61	3,51	0,10	9,58	0,98
35	8,66	3,15	0,08	9,52	0,97
35,1	8,67	2,80	0,06	9,43	0,96
35,2	8,63	2,45	0,05	9,29	0,94
35,3	8,54	2,15	0,04	9,13	0,92
35,4	8,42	1,86	0,03	8,92	0,9
35,5	8,28	1,60	0,02	8,71	0,87
35,6	8,08	1,37	0,01	8,45	0,84
35,7	7,87	1,16	0,01	8,18	0,81
35,8	7,59	0,99	0,01	7,86	0,77
35,9	7,26	0,83	0,01	7,48	0,73
36	6,94	0,69	0,00	7,13	0,7
36,1	6,61	0,58	0,00	6,76	0,65
36,2	6,22	0,47	0,00	6,35	0,61
36,3	5,80	0,38	0,00	5,9	0,56
36,4	5,40	0,30	0,00	5,48	0,52
36,5	4,98	0,24	0,00	5,05	0,47
36,6	4,56	0,19	0,00	4,61	0,43
36,7	4,17	0,15	0,00	4,21	0,39
36,8	3,76	0,12	0,00	3,79	0,35
36,9	3,40	0,09	0,00	3,43	0,31
37	3,02	0,07	0,00	3,04	0,28
37,1	2,71	0,05	0,00	2,72	0,25
37,2	2,38	0,04	0,00	2,39	0,22
37,3	2,08	0,03	0,00	2,09	0,19
37,4	1,80	0,03	0,00	1,8	0,16
37,5	1,56	0,02	0,00	1,56	0,14

37,6	1,33	0,01	0,00	1,33	0,12
37,7	1,13	0,01	0,00	1,13	0,1
37,8	0,95	0,01	0,00	0,95	0,08
37,9	0,79	0,00	0,00	0,79	0,07
38	0,66	0,00	0,00	0,66	0,06
38,1	0,54	0,00	0,00	0,54	0,05
38,2	0,45	0,00	0,00	0,45	0,04
38,3	0,35	0,00	0,00	0,35	0,03
38,4	0,28	0,00	0,00	0,28	0,02
38,5	0,23	0,00	0,00	0,23	0,02
38,6	0,18	0,00	0,00	0,18	0,01
38,7	0,14	0,00	0,00	0,14	0,01
38,8	0,11	0,00	0,00	0,11	0,01
38,9	0,09	0,00	0,00	0,09	0,01
39	0,07	0,00	0,00	0,07	0
39,1	0,05	0,00	0,00	0,05	0
39,2	0,04	0,00	0,00	0,04	0
39,3	0,03	0,00	0,00	0,03	0
39,4	0,02	0,00	0,00	0,02	0
39,5	0,01	0,00	0,00	0,01	0
39,6	0,01	0,00	0,00	0,01	0
39,7	0,01	0,00	0,00	0,01	0
39,8	0,01	0,00	0,00	0,01	0
39,9	0,00	0,00	0,00	0	0
40	0,00	0,00	0,00	0	0
40,1	0,00	0,00	0,00	0	0
40,2	0,00	0,00	0,00	0	0
40,3	0,00	0,00	0,00	0	0
40,4	0,00	0,00	0,00	0	0
40,5	0,00	0,00	0,00	0	0

40,6	0,00	0,00	0,00	0	0
40,7	0,00	0,00	0,00	0	0
40,8	0,00	0,00	0,00	0	0
40,9	0,00	0,00	0,00	0	0
41	0,00	0,00	0,00	0	0

4.1.5 Wiązka protonów o energii 70 MeV

Tabela 4.5: Symulacje komputerowe uproszczonego modulatora energii poszerzającego pik Bragga o 4 mm dla wiązki protonów o energii 70 MeV. W tabeli umieszczono energię zdeponowaną przez wiązkę protonów, która nie przeszła przez warstwę absorbenta, a także wiązki, które pokonały warstwę PMMA o grubości 0,5 h i h. W tabeli znajduje się także suma wiązek pomnożonych przez wagi, proporcjonalne do kątów rozwarcia wycinków walca oraz głębokościowy rozkład dawki względnej dla projektowanego modulatora.

Głębokość	Energia zdeponowana w poszczególnych detektorach [keV·10 ¹⁰]				Rozkład dawki względnej SOBP
	bez absorbenta	0,5 h	h	suma wiązek	
0,1	1,77	1,81	1,85	2,94	0,31
0,2	1,77	1,81	1,85	2,94	0,31
0,3	1,78	1,81	1,86	2,95	0,31
0,4	1,78	1,82	1,86	2,95	0,31
0,5	1,78	1,82	1,86	2,95	0,31
0,6	1,78	1,82	1,86	2,96	0,31
0,7	1,78	1,82	1,87	2,96	0,31
0,8	1,78	1,83	1,87	2,96	0,31
0,9	1,79	1,83	1,87	2,97	0,31
1	1,79	1,83	1,87	2,97	0,31
1,1	1,79	1,83	1,87	2,97	0,31
1,2	1,79	1,83	1,88	2,98	0,31
1,3	1,80	1,83	1,88	2,98	0,31
1,4	1,79	1,84	1,88	2,98	0,31
1,5	1,80	1,84	1,88	2,99	0,31
1,6	1,80	1,84	1,89	2,99	0,31
1,7	1,80	1,84	1,89	2,99	0,31
1,8	1,81	1,84	1,89	3,00	0,31
1,9	1,81	1,84	1,89	3,00	0,31

2	1,81	1,85	1,89	3,00	0,32
2,1	1,81	1,85	1,90	3,01	0,32
2,2	1,81	1,85	1,90	3,01	0,32
2,3	1,82	1,86	1,90	3,02	0,32
2,4	1,81	1,86	1,90	3,02	0,32
2,5	1,82	1,86	1,90	3,02	0,32
2,6	1,82	1,86	1,91	3,02	0,32
2,7	1,82	1,86	1,91	3,03	0,32
2,8	1,82	1,87	1,91	3,03	0,32
2,9	1,83	1,87	1,92	3,04	0,32
3	1,83	1,87	1,92	3,04	0,32
3,1	1,83	1,87	1,92	3,04	0,32
3,2	1,83	1,88	1,92	3,04	0,32
3,3	1,83	1,88	1,92	3,05	0,32
3,4	1,84	1,88	1,92	3,05	0,32
3,5	1,84	1,88	1,93	3,06	0,32
3,6	1,84	1,88	1,93	3,06	0,32
3,7	1,84	1,88	1,93	3,06	0,32
3,8	1,84	1,89	1,94	3,07	0,32
3,9	1,85	1,89	1,94	3,07	0,32
4	1,85	1,89	1,94	3,08	0,32
4,1	1,85	1,89	1,94	3,08	0,32
4,2	1,85	1,90	1,94	3,08	0,32
4,3	1,85	1,90	1,95	3,09	0,32
4,4	1,86	1,90	1,95	3,09	0,32
4,5	1,86	1,90	1,96	3,09	0,32
4,6	1,87	1,91	1,96	3,10	0,33
4,7	1,86	1,91	1,96	3,10	0,33
4,8	1,87	1,91	1,96	3,11	0,33
4,9	1,87	1,91	1,96	3,11	0,33

5	1,87	1,92	1,97	3,11	0,33
5,1	1,87	1,92	1,97	3,12	0,33
5,2	1,88	1,92	1,97	3,12	0,33
5,3	1,88	1,92	1,98	3,12	0,33
5,4	1,88	1,93	1,98	3,13	0,33
5,5	1,88	1,93	1,98	3,13	0,33
5,6	1,88	1,93	1,98	3,14	0,33
5,7	1,89	1,93	1,99	3,14	0,33
5,8	1,89	1,94	1,99	3,14	0,33
5,9	1,89	1,94	1,99	3,15	0,33
6	1,89	1,94	2,00	3,15	0,33
6,1	1,90	1,94	2,00	3,16	0,33
6,2	1,90	1,95	2,00	3,16	0,33
6,3	1,90	1,95	2,00	3,17	0,33
6,4	1,90	1,95	2,00	3,17	0,33
6,5	1,91	1,96	2,01	3,17	0,33
6,6	1,91	1,96	2,01	3,18	0,33
6,7	1,91	1,96	2,01	3,18	0,33
6,8	1,91	1,96	2,02	3,19	0,33
6,9	1,91	1,97	2,02	3,19	0,33
7	1,92	1,97	2,02	3,19	0,34
7,1	1,92	1,97	2,02	3,20	0,34
7,2	1,92	1,97	2,03	3,20	0,34
7,3	1,93	1,97	2,03	3,21	0,34
7,4	1,93	1,97	2,04	3,21	0,34
7,5	1,93	1,98	2,04	3,22	0,34
7,6	1,93	1,98	2,04	3,22	0,34
7,7	1,94	1,99	2,05	3,23	0,34
7,8	1,94	1,99	2,05	3,23	0,34
7,9	1,94	1,99	2,05	3,23	0,34

8	1,94	1,99	2,05	3,24	0,34
8,1	1,94	2,00	2,06	3,24	0,34
8,2	1,95	2,00	2,06	3,25	0,34
8,3	1,95	2,00	2,06	3,25	0,34
8,4	1,95	2,01	2,07	3,25	0,34
8,5	1,95	2,01	2,07	3,26	0,34
8,6	1,96	2,01	2,07	3,26	0,34
8,7	1,96	2,01	2,08	3,27	0,34
8,8	1,96	2,02	2,08	3,27	0,34
8,9	1,97	2,02	2,08	3,28	0,34
9	1,97	2,02	2,09	3,28	0,34
9,1	1,97	2,03	2,09	3,29	0,34
9,2	1,97	2,03	2,09	3,29	0,35
9,3	1,98	2,03	2,10	3,30	0,35
9,4	1,98	2,03	2,10	3,30	0,35
9,5	1,98	2,04	2,10	3,31	0,35
9,6	1,98	2,04	2,10	3,31	0,35
9,7	1,99	2,05	2,11	3,32	0,35
9,8	1,99	2,05	2,11	3,32	0,35
9,9	1,99	2,05	2,12	3,33	0,35
10	2,00	2,05	2,12	3,33	0,35
10,1	2,00	2,06	2,12	3,33	0,35
10,2	2,00	2,06	2,13	3,34	0,35
10,3	2,00	2,06	2,13	3,34	0,35
10,4	2,01	2,07	2,13	3,35	0,35
10,5	2,01	2,07	2,14	3,35	0,35
10,6	2,01	2,07	2,14	3,36	0,35
10,7	2,01	2,07	2,14	3,36	0,35
10,8	2,02	2,08	2,15	3,37	0,35
10,9	2,02	2,08	2,15	3,37	0,35

11	2,03	2,09	2,15	3,38	0,36
11,1	2,03	2,09	2,16	3,38	0,36
11,2	2,03	2,09	2,16	3,39	0,36
11,3	2,03	2,10	2,16	3,40	0,36
11,4	2,04	2,10	2,17	3,40	0,36
11,5	2,04	2,10	2,17	3,40	0,36
11,6	2,04	2,11	2,17	3,41	0,36
11,7	2,04	2,11	2,18	3,42	0,36
11,8	2,05	2,11	2,18	3,42	0,36
11,9	2,05	2,11	2,19	3,43	0,36
12	2,05	2,12	2,19	3,43	0,36
12,1	2,06	2,12	2,20	3,44	0,36
12,2	2,06	2,13	2,20	3,44	0,36
12,3	2,06	2,13	2,20	3,45	0,36
12,4	2,07	2,13	2,21	3,46	0,36
12,5	2,07	2,14	2,21	3,46	0,36
12,6	2,07	2,14	2,21	3,47	0,36
12,7	2,08	2,15	2,22	3,47	0,36
12,8	2,08	2,15	2,22	3,48	0,36
12,9	2,08	2,15	2,22	3,48	0,37
13	2,08	2,16	2,23	3,49	0,37
13,1	2,09	2,16	2,23	3,49	0,37
13,2	2,09	2,16	2,24	3,50	0,37
13,3	2,10	2,17	2,24	3,51	0,37
13,4	2,10	2,17	2,25	3,51	0,37
13,5	2,10	2,17	2,25	3,52	0,37
13,6	2,11	2,18	2,25	3,52	0,37
13,7	2,11	2,18	2,26	3,53	0,37
13,8	2,11	2,18	2,26	3,53	0,37
13,9	2,12	2,19	2,27	3,54	0,37

14	2,12	2,19	2,27	3,55	0,37
14,1	2,12	2,19	2,27	3,55	0,37
14,2	2,13	2,20	2,28	3,56	0,37
14,3	2,13	2,20	2,28	3,57	0,37
14,4	2,13	2,21	2,29	3,57	0,37
14,5	2,14	2,21	2,29	3,58	0,38
14,6	2,14	2,21	2,30	3,58	0,38
14,7	2,14	2,22	2,30	3,59	0,38
14,8	2,15	2,22	2,31	3,60	0,38
14,9	2,15	2,23	2,31	3,60	0,38
15	2,15	2,23	2,32	3,61	0,38
15,1	2,16	2,23	2,32	3,62	0,38
15,2	2,16	2,24	2,33	3,62	0,38
15,3	2,17	2,24	2,33	3,63	0,38
15,4	2,17	2,25	2,33	3,64	0,38
15,5	2,17	2,25	2,34	3,64	0,38
15,6	2,18	2,25	2,34	3,65	0,38
15,7	2,18	2,26	2,35	3,65	0,38
15,8	2,18	2,26	2,35	3,66	0,38
15,9	2,19	2,27	2,36	3,67	0,39
16	2,19	2,27	2,36	3,67	0,39
16,1	2,19	2,28	2,37	3,68	0,39
16,2	2,20	2,28	2,37	3,69	0,39
16,3	2,20	2,29	2,38	3,69	0,39
16,4	2,21	2,29	2,38	3,70	0,39
16,5	2,21	2,30	2,39	3,71	0,39
16,6	2,21	2,30	2,39	3,72	0,39
16,7	2,22	2,30	2,40	3,72	0,39
16,8	2,22	2,31	2,40	3,73	0,39
16,9	2,23	2,31	2,41	3,74	0,39

17	2,23	2,32	2,41	3,74	0,39
17,1	2,23	2,32	2,42	3,75	0,39
17,2	2,24	2,33	2,42	3,76	0,39
17,3	2,24	2,33	2,43	3,77	0,4
17,4	2,25	2,33	2,43	3,78	0,4
17,5	2,25	2,34	2,44	3,78	0,4
17,6	2,25	2,34	2,45	3,79	0,4
17,7	2,26	2,35	2,45	3,79	0,4
17,8	2,26	2,35	2,46	3,80	0,4
17,9	2,27	2,36	2,46	3,81	0,4
18	2,27	2,36	2,47	3,82	0,4
18,1	2,28	2,37	2,47	3,83	0,4
18,2	2,28	2,37	2,48	3,83	0,4
18,3	2,29	2,38	2,49	3,84	0,4
18,4	2,29	2,38	2,49	3,85	0,4
18,5	2,29	2,39	2,50	3,86	0,41
18,6	2,30	2,39	2,50	3,87	0,41
18,7	2,30	2,40	2,51	3,87	0,41
18,8	2,31	2,40	2,51	3,88	0,41
18,9	2,31	2,41	2,52	3,89	0,41
19	2,32	2,41	2,53	3,90	0,41
19,1	2,32	2,42	2,53	3,91	0,41
19,2	2,32	2,42	2,54	3,91	0,41
19,3	2,33	2,43	2,55	3,93	0,41
19,4	2,33	2,44	2,55	3,93	0,41
19,5	2,34	2,44	2,56	3,94	0,41
19,6	2,34	2,45	2,57	3,95	0,41
19,7	2,35	2,45	2,57	3,96	0,42
19,8	2,35	2,46	2,58	3,97	0,42
19,9	2,36	2,46	2,59	3,97	0,42

20	2,36	2,47	2,59	3,98	0,42
20,1	2,37	2,48	2,60	3,99	0,42
20,2	2,37	2,48	2,61	4,00	0,42
20,3	2,38	2,49	2,61	4,01	0,42
20,4	2,38	2,49	2,62	4,02	0,42
20,5	2,39	2,50	2,63	4,03	0,42
20,6	2,39	2,50	2,63	4,04	0,42
20,7	2,40	2,51	2,64	4,05	0,42
20,8	2,40	2,52	2,65	4,06	0,43
20,9	2,41	2,52	2,66	4,07	0,43
21	2,41	2,53	2,66	4,08	0,43
21,1	2,42	2,53	2,67	4,09	0,43
21,2	2,42	2,54	2,68	4,10	0,43
21,3	2,43	2,55	2,69	4,11	0,43
21,4	2,44	2,55	2,69	4,12	0,43
21,5	2,44	2,56	2,70	4,13	0,43
21,6	2,45	2,57	2,71	4,14	0,43
21,7	2,45	2,57	2,72	4,14	0,44
21,8	2,46	2,58	2,72	4,16	0,44
21,9	2,46	2,59	2,73	4,17	0,44
22	2,47	2,59	2,74	4,18	0,44
22,1	2,47	2,60	2,75	4,19	0,44
22,2	2,48	2,61	2,76	4,20	0,44
22,3	2,49	2,61	2,76	4,21	0,44
22,4	2,49	2,62	2,77	4,22	0,44
22,5	2,50	2,63	2,78	4,23	0,44
22,6	2,50	2,64	2,79	4,24	0,45
22,7	2,51	2,64	2,80	4,26	0,45
22,8	2,52	2,65	2,81	4,27	0,45
22,9	2,52	2,66	2,81	4,27	0,45

23	2,53	2,66	2,82	4,29	0,45
23,1	2,53	2,67	2,83	4,30	0,45
23,2	2,54	2,68	2,85	4,31	0,45
23,3	2,54	2,69	2,85	4,32	0,45
23,4	2,55	2,69	2,86	4,33	0,46
23,5	2,56	2,70	2,87	4,35	0,46
23,6	2,57	2,71	2,88	4,36	0,46
23,7	2,57	2,71	2,89	4,37	0,46
23,8	2,58	2,72	2,90	4,38	0,46
23,9	2,59	2,73	2,91	4,40	0,46
24	2,59	2,74	2,92	4,41	0,46
24,1	2,60	2,75	2,93	4,42	0,46
24,2	2,61	2,76	2,94	4,43	0,47
24,3	2,61	2,76	2,95	4,45	0,47
24,4	2,62	2,77	2,96	4,46	0,47
24,5	2,63	2,78	2,97	4,47	0,47
24,6	2,63	2,79	2,98	4,48	0,47
24,7	2,64	2,80	2,99	4,50	0,47
24,8	2,65	2,81	3,00	4,51	0,47
24,9	2,65	2,82	3,01	4,53	0,48
25	2,66	2,83	3,03	4,54	0,48
25,1	2,67	2,84	3,04	4,55	0,48
25,2	2,68	2,84	3,05	4,57	0,48
25,3	2,68	2,85	3,06	4,58	0,48
25,4	2,69	2,86	3,07	4,59	0,48
25,5	2,70	2,87	3,08	4,61	0,48
25,6	2,71	2,88	3,09	4,63	0,49
25,7	2,71	2,89	3,11	4,64	0,49
25,8	2,72	2,90	3,12	4,65	0,49
25,9	2,73	2,91	3,13	4,67	0,49

26	2,74	2,92	3,14	4,69	0,49
26,1	2,75	2,93	3,16	4,70	0,49
26,2	2,76	2,94	3,17	4,72	0,5
26,3	2,77	2,95	3,18	4,74	0,5
26,4	2,77	2,96	3,20	4,75	0,5
26,5	2,78	2,97	3,21	4,76	0,5
26,6	2,79	2,98	3,22	4,78	0,5
26,7	2,80	2,99	3,24	4,80	0,5
26,8	2,81	3,00	3,25	4,82	0,51
26,9	2,82	3,01	3,27	4,83	0,51
27	2,83	3,02	3,28	4,85	0,51
27,1	2,83	3,04	3,29	4,86	0,51
27,2	2,84	3,04	3,31	4,89	0,51
27,3	2,85	3,06	3,33	4,90	0,51
27,4	2,86	3,07	3,34	4,92	0,52
27,5	2,87	3,08	3,36	4,94	0,52
27,6	2,88	3,09	3,37	4,96	0,52
27,7	2,89	3,10	3,39	4,98	0,52
27,8	2,90	3,12	3,41	4,99	0,52
27,9	2,91	3,13	3,42	5,01	0,53
28	2,92	3,14	3,44	5,03	0,53
28,1	2,93	3,15	3,46	5,05	0,53
28,2	2,94	3,17	3,48	5,07	0,53
28,3	2,95	3,18	3,50	5,09	0,53
28,4	2,96	3,19	3,51	5,11	0,54
28,5	2,97	3,21	3,53	5,13	0,54
28,6	2,98	3,22	3,55	5,16	0,54
28,7	2,99	3,23	3,57	5,18	0,54
28,8	3,00	3,25	3,59	5,20	0,55
28,9	3,01	3,26	3,61	5,22	0,55

29	3,02	3,28	3,63	5,24	0,55
29,1	3,03	3,29	3,65	5,27	0,55
29,2	3,04	3,31	3,67	5,29	0,56
29,3	3,06	3,32	3,69	5,31	0,56
29,4	3,07	3,34	3,71	5,34	0,56
29,5	3,08	3,35	3,74	5,36	0,56
29,6	3,09	3,37	3,76	5,39	0,57
29,7	3,10	3,39	3,78	5,41	0,57
29,8	3,11	3,40	3,81	5,44	0,57
29,9	3,13	3,42	3,83	5,46	0,57
30	3,14	3,44	3,86	5,49	0,58
30,1	3,15	3,46	3,88	5,52	0,58
30,2	3,17	3,47	3,91	5,54	0,58
30,3	3,18	3,49	3,93	5,57	0,59
30,4	3,19	3,51	3,96	5,60	0,59
30,5	3,21	3,53	3,99	5,63	0,59
30,6	3,22	3,54	4,02	5,66	0,59
30,7	3,23	3,56	4,05	5,69	0,6
30,8	3,25	3,58	4,08	5,72	0,6
30,9	3,26	3,60	4,11	5,75	0,6
31	3,28	3,62	4,14	5,78	0,61
31,1	3,29	3,64	4,17	5,81	0,61
31,2	3,30	3,67	4,21	5,85	0,61
31,3	3,32	3,69	4,24	5,88	0,62
31,4	3,34	3,71	4,27	5,91	0,62
31,5	3,35	3,73	4,31	5,95	0,62
31,6	3,37	3,76	4,35	5,99	0,63
31,7	3,39	3,78	4,38	6,02	0,63
31,8	3,40	3,80	4,43	6,06	0,64
31,9	3,42	3,83	4,46	6,10	0,64

32	3,44	3,85	4,51	6,14	0,64
32,1	3,45	3,88	4,55	6,17	0,65
32,2	3,47	3,90	4,59	6,22	0,65
32,3	3,49	3,93	4,64	6,26	0,66
32,4	3,51	3,96	4,69	6,30	0,66
32,5	3,52	3,98	4,74	6,34	0,67
32,6	3,54	4,01	4,79	6,39	0,67
32,7	3,56	4,05	4,84	6,44	0,68
32,8	3,58	4,07	4,90	6,49	0,68
32,9	3,60	4,10	4,96	6,54	0,69
33	3,62	4,13	5,02	6,59	0,69
33,1	3,64	4,17	5,08	6,64	0,7
33,2	3,66	4,20	5,15	6,70	0,7
33,3	3,68	4,23	5,23	6,75	0,71
33,4	3,71	4,27	5,30	6,82	0,72
33,5	3,73	4,30	5,38	6,88	0,72
33,6	3,75	4,34	5,47	6,94	0,73
33,7	3,78	4,38	5,56	7,01	0,74
33,8	3,80	4,42	5,66	7,08	0,74
33,9	3,82	4,46	5,75	7,15	0,75
34	3,85	4,50	5,86	7,23	0,76
34,1	3,87	4,54	5,98	7,30	0,77
34,2	3,90	4,59	6,10	7,39	0,78
34,3	3,93	4,63	6,22	7,48	0,78
34,4	3,95	4,68	6,35	7,56	0,79
34,5	3,98	4,73	6,49	7,66	0,8
34,6	4,01	4,78	6,63	7,75	0,81
34,7	4,04	4,84	6,79	7,85	0,82
34,8	4,07	4,89	6,94	7,95	0,83
34,9	4,10	4,95	7,09	8,05	0,85

35	4,13	5,01	7,24	8,16	0,86
35,1	4,16	5,07	7,40	8,27	0,87
35,2	4,19	5,14	7,55	8,37	0,88
35,3	4,23	5,21	7,70	8,48	0,89
35,4	4,26	5,29	7,84	8,59	0,9
35,5	4,30	5,37	7,98	8,70	0,91
35,6	4,34	5,46	8,09	8,80	0,92
35,7	4,37	5,54	8,20	8,90	0,93
35,8	4,41	5,64	8,28	8,99	0,94
35,9	4,45	5,73	8,35	9,08	0,95
36	4,49	5,84	8,38	9,16	0,96
36,1	4,54	5,95	8,39	9,24	0,97
36,2	4,58	6,07	8,35	9,30	0,98
36,3	4,63	6,20	8,30	9,37	0,98
36,4	4,67	6,33	8,22	9,42	0,99
36,5	4,72	6,47	8,10	9,45	0,99
36,6	4,77	6,61	7,94	9,49	1
36,7	4,82	6,76	7,75	9,51	1
36,8	4,88	6,91	7,52	9,52	1
36,9	4,94	7,07	7,27	9,52	1
37	5,00	7,22	7,01	9,53	1
37,1	5,06	7,37	6,72	9,52	1
37,2	5,13	7,52	6,40	9,51	1
37,3	5,20	7,67	6,03	9,48	1
37,4	5,27	7,82	5,65	9,45	0,99
37,5	5,35	7,95	5,30	9,43	0,99
37,6	5,44	8,06	4,93	9,41	0,99
37,7	5,52	8,17	4,54	9,38	0,98
37,8	5,62	8,24	4,17	9,36	0,98
37,9	5,72	8,30	3,82	9,34	0,98

38	5,82	8,37	3,47	9,33	0,98
38,1	5,94	8,36	3,11	9,31	0,98
38,2	6,05	8,35	2,77	9,30	0,98
38,3	6,17	8,31	2,47	9,29	0,98
38,4	6,29	8,21	2,18	9,28	0,97
38,5	6,44	8,09	1,92	9,29	0,98
38,6	6,58	7,96	1,66	9,31	0,98
38,7	6,73	7,76	1,44	9,32	0,98
38,8	6,88	7,54	1,22	9,33	0,98
38,9	7,04	7,31	1,04	9,36	0,98
39	7,19	7,02	0,89	9,38	0,98
39,1	7,34	6,74	0,76	9,41	0,99
39,2	7,49	6,43	0,64	9,43	0,99
39,3	7,64	6,07	0,53	9,44	0,99
39,4	7,79	5,70	0,43	9,46	0,99
39,5	7,93	5,33	0,34	9,47	0,99
39,6	8,05	4,95	0,28	9,46	0,99
39,7	8,16	4,56	0,24	9,46	0,99
39,8	8,25	4,20	0,19	9,43	0,99
39,9	8,33	3,85	0,15	9,40	0,99
40	8,35	3,48	0,12	9,32	0,98
40,1	8,38	3,13	0,09	9,25	0,97
40,2	8,37	2,79	0,08	9,14	0,96
40,3	8,33	2,48	0,06	9,01	0,95
40,4	8,26	2,21	0,04	8,87	0,93
40,5	8,14	1,93	0,04	8,66	0,91
40,6	8,02	1,67	0,03	8,47	0,89
40,7	7,83	1,44	0,02	8,22	0,86
40,8	7,62	1,26	0,01	7,96	0,84
40,9	7,36	1,07	0,01	7,65	0,8

41	7,08	0,91	0,01	7,33	0,77
41,1	6,81	0,77	0,01	7,01	0,74
41,2	6,49	0,64	0,01	6,66	0,7
41,3	6,16	0,53	0,00	6,30	0,66
41,4	5,80	0,44	0,00	5,92	0,62
41,5	5,44	0,37	0,00	5,53	0,58
41,6	5,05	0,31	0,00	5,13	0,54
41,7	4,68	0,25	0,00	4,75	0,5
41,8	4,30	0,20	0,00	4,35	0,46
41,9	3,90	0,16	0,00	3,94	0,41
42	3,57	0,13	0,00	3,60	0,38
42,1	3,21	0,10	0,00	3,24	0,34
42,2	2,90	0,08	0,00	2,92	0,31
42,3	2,57	0,06	0,00	2,59	0,27
42,4	2,27	0,05	0,00	2,29	0,24
42,5	2,00	0,04	0,00	2,01	0,21
42,6	1,77	0,03	0,00	1,78	0,19
42,7	1,54	0,02	0,00	1,54	0,16
42,8	1,34	0,01	0,00	1,35	0,14
42,9	1,15	0,01	0,00	1,15	0,12
43	0,97	0,01	0,00	0,98	0,1
43,1	0,84	0,01	0,00	0,84	0,09
43,2	0,70	0,01	0,00	0,70	0,07
43,3	0,60	0,00	0,00	0,60	0,06
43,4	0,49	0,00	0,00	0,49	0,05
43,5	0,40	0,00	0,00	0,41	0,04
43,6	0,34	0,00	0,00	0,34	0,04
43,7	0,27	0,00	0,00	0,27	0,03
43,8	0,21	0,00	0,00	0,21	0,02
43,9	0,17	0,00	0,00	0,17	0,02

44	0,14	0,00	0,00	0,14	0,01
44,1	0,11	0,00	0,00	0,11	0,01
44,2	0,08	0,00	0,00	0,08	0,01
44,3	0,07	0,00	0,00	0,07	0,01
44,4	0,05	0,00	0,00	0,05	0,01
44,5	0,04	0,00	0,00	0,04	0
44,6	0,03	0,00	0,00	0,03	0
44,7	0,02	0,00	0,00	0,02	0
44,8	0,02	0,00	0,00	0,02	0
44,9	0,01	0,00	0,00	0,01	0
45	0,01	0,00	0,00	0,01	0
45,1	0,01	0,00	0,00	0,01	0
45,2	0,01	0,00	0,00	0,01	0
45,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0
45,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0
45,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0
45,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0
45,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0
45,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0
45,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0
46	0,00	0,00	0,00	0,00	0
46,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0
46,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0
46,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0
46,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0
46,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0
46,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0
46,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0
46,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0
46,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0

47	0,00	0,00	0,00	0,00	0
----	------	------	------	------	---

4.1.6 Obrót koła modulacyjnego.

Tabela 4.6: Rozkłady dawki na głębokości uzyskane dzięki obrotowi uproszczonego modulatora zasięgu o kąt 360° .

Głębokość	Rozkład dawki na głębokości				
	50 MeV	55 MeV	60 MeV	65 MeV	70 MeV
0,1	0,39	0,36	0,34	0,32	0,31
0,2	0,39	0,36	0,34	0,32	0,31
0,3	0,39	0,36	0,34	0,32	0,31
0,4	0,39	0,36	0,34	0,32	0,31
0,5	0,39	0,37	0,34	0,32	0,31
0,6	0,39	0,37	0,34	0,32	0,31
0,7	0,39	0,37	0,34	0,32	0,31
0,8	0,39	0,37	0,34	0,32	0,31
0,9	0,39	0,37	0,34	0,32	0,31
1	0,39	0,37	0,34	0,32	0,31
1,1	0,39	0,37	0,34	0,33	0,31
1,2	0,40	0,37	0,34	0,33	0,31
1,3	0,40	0,37	0,34	0,33	0,31
1,4	0,40	0,37	0,34	0,33	0,31
1,5	0,40	0,37	0,34	0,33	0,31
1,6	0,40	0,37	0,34	0,33	0,32
1,7	0,40	0,37	0,35	0,33	0,32
1,8	0,40	0,37	0,35	0,33	0,32
1,9	0,40	0,37	0,35	0,33	0,32
2	0,40	0,37	0,35	0,33	0,32
2,1	0,40	0,38	0,35	0,33	0,32
2,2	0,40	0,38	0,35	0,33	0,32

2,3	0,40	0,38	0,35	0,33	0,32
2,4	0,41	0,38	0,35	0,33	0,32
2,5	0,41	0,38	0,35	0,33	0,32
2,6	0,41	0,38	0,35	0,33	0,32
2,7	0,41	0,38	0,35	0,33	0,32
2,8	0,41	0,38	0,35	0,33	0,32
2,9	0,41	0,38	0,35	0,33	0,32
3	0,41	0,38	0,35	0,33	0,32
3,1	0,41	0,38	0,35	0,33	0,32
3,2	0,42	0,38	0,35	0,33	0,32
3,3	0,42	0,38	0,35	0,34	0,32
3,4	0,42	0,39	0,35	0,34	0,32
3,5	0,42	0,39	0,36	0,34	0,32
3,6	0,42	0,39	0,36	0,34	0,32
3,7	0,42	0,39	0,36	0,34	0,32
3,8	0,42	0,39	0,36	0,34	0,32
3,9	0,42	0,39	0,36	0,34	0,32
4	0,42	0,39	0,36	0,34	0,32
4,1	0,42	0,39	0,36	0,34	0,32
4,2	0,43	0,39	0,36	0,34	0,33
4,3	0,43	0,39	0,36	0,34	0,32
4,4	0,43	0,39	0,36	0,34	0,32
4,5	0,43	0,39	0,36	0,34	0,33
4,6	0,43	0,39	0,36	0,34	0,33
4,7	0,43	0,40	0,36	0,34	0,33
4,8	0,43	0,40	0,36	0,34	0,33
4,9	0,43	0,40	0,36	0,34	0,33
5	0,43	0,40	0,37	0,34	0,33
5,1	0,44	0,40	0,37	0,34	0,33
5,2	0,44	0,40	0,37	0,34	0,33

5,3	0,44	0,40	0,37	0,34	0,33
5,4	0,44	0,40	0,37	0,35	0,33
5,5	0,44	0,40	0,37	0,35	0,33
5,6	0,44	0,40	0,37	0,35	0,33
5,7	0,44	0,40	0,37	0,35	0,33
5,8	0,45	0,41	0,37	0,35	0,33
5,9	0,45	0,41	0,37	0,35	0,33
6	0,45	0,41	0,37	0,35	0,33
6,1	0,45	0,41	0,37	0,35	0,33
6,2	0,45	0,41	0,37	0,35	0,33
6,3	0,45	0,41	0,37	0,35	0,33
6,4	0,45	0,41	0,37	0,35	0,33
6,5	0,45	0,41	0,38	0,35	0,33
6,6	0,45	0,41	0,37	0,35	0,33
6,7	0,46	0,41	0,38	0,35	0,34
6,8	0,46	0,42	0,38	0,35	0,34
6,9	0,46	0,42	0,38	0,35	0,34
7	0,46	0,42	0,38	0,35	0,34
7,1	0,46	0,42	0,38	0,35	0,34
7,2	0,46	0,42	0,38	0,36	0,34
7,3	0,47	0,42	0,38	0,36	0,34
7,4	0,47	0,42	0,38	0,36	0,34
7,5	0,47	0,42	0,38	0,36	0,34
7,6	0,47	0,42	0,38	0,36	0,34
7,7	0,47	0,42	0,38	0,36	0,34
7,8	0,47	0,42	0,38	0,36	0,34
7,9	0,48	0,43	0,39	0,36	0,34
8	0,48	0,43	0,39	0,36	0,34
8,1	0,48	0,43	0,39	0,36	0,34
8,2	0,48	0,43	0,39	0,36	0,34

8,3	0,48	0,43	0,39	0,36	0,34
8,4	0,48	0,43	0,39	0,36	0,34
8,5	0,49	0,43	0,39	0,36	0,34
8,6	0,49	0,43	0,39	0,36	0,34
8,7	0,49	0,44	0,39	0,36	0,34
8,8	0,49	0,44	0,39	0,36	0,34
8,9	0,49	0,44	0,39	0,36	0,34
9	0,49	0,44	0,39	0,37	0,35
9,1	0,50	0,44	0,39	0,37	0,35
9,2	0,50	0,44	0,40	0,37	0,35
9,3	0,50	0,44	0,40	0,37	0,35
9,4	0,50	0,44	0,40	0,37	0,35
9,5	0,50	0,45	0,40	0,37	0,35
9,6	0,51	0,45	0,40	0,37	0,35
9,7	0,51	0,45	0,40	0,37	0,35
9,8	0,51	0,45	0,40	0,37	0,35
9,9	0,51	0,45	0,40	0,37	0,35
10	0,51	0,45	0,40	0,37	0,35
10,1	0,52	0,45	0,40	0,37	0,35
10,2	0,52	0,46	0,40	0,37	0,35
10,3	0,52	0,46	0,40	0,37	0,35
10,4	0,52	0,46	0,41	0,37	0,35
10,5	0,52	0,46	0,41	0,38	0,35
10,6	0,53	0,46	0,41	0,38	0,35
10,7	0,53	0,46	0,41	0,38	0,35
10,8	0,53	0,46	0,41	0,38	0,36
10,9	0,53	0,46	0,41	0,38	0,36
11	0,54	0,47	0,41	0,38	0,36
11,1	0,54	0,47	0,41	0,38	0,36
11,2	0,54	0,47	0,41	0,38	0,36

11,3	0,54	0,47	0,41	0,38	0,36
11,4	0,55	0,47	0,42	0,38	0,36
11,5	0,55	0,47	0,42	0,38	0,36
11,6	0,55	0,48	0,42	0,38	0,36
11,7	0,55	0,48	0,42	0,38	0,36
11,8	0,56	0,48	0,42	0,38	0,36
11,9	0,56	0,48	0,42	0,39	0,36
12	0,56	0,48	0,42	0,39	0,36
12,1	0,57	0,48	0,42	0,39	0,36
12,2	0,57	0,49	0,42	0,39	0,36
12,3	0,57	0,49	0,43	0,39	0,36
12,4	0,57	0,49	0,43	0,39	0,36
12,5	0,58	0,49	0,43	0,39	0,36
12,6	0,58	0,49	0,43	0,39	0,37
12,7	0,58	0,49	0,43	0,39	0,37
12,8	0,59	0,49	0,43	0,39	0,37
12,9	0,59	0,50	0,43	0,39	0,37
13	0,60	0,50	0,43	0,39	0,37
13,1	0,60	0,50	0,43	0,40	0,37
13,2	0,60	0,50	0,44	0,39	0,37
13,3	0,61	0,50	0,44	0,40	0,37
13,4	0,61	0,51	0,44	0,40	0,37
13,5	0,61	0,51	0,44	0,40	0,37
13,6	0,62	0,51	0,44	0,40	0,37
13,7	0,62	0,51	0,44	0,40	0,37
13,8	0,63	0,51	0,44	0,40	0,37
13,9	0,63	0,52	0,44	0,40	0,37
14	0,64	0,52	0,44	0,40	0,37
14,1	0,64	0,52	0,45	0,40	0,37
14,2	0,64	0,52	0,45	0,41	0,37

14,3	0,65	0,52	0,45	0,41	0,38
14,4	0,65	0,53	0,45	0,41	0,38
14,5	0,66	0,53	0,45	0,41	0,38
14,6	0,66	0,53	0,45	0,41	0,38
14,7	0,67	0,53	0,45	0,41	0,38
14,8	0,67	0,54	0,46	0,41	0,38
14,9	0,68	0,54	0,46	0,41	0,38
15	0,68	0,54	0,46	0,41	0,38
15,1	0,69	0,54	0,46	0,41	0,38
15,2	0,70	0,55	0,46	0,41	0,38
15,3	0,70	0,55	0,46	0,41	0,38
15,4	0,71	0,55	0,46	0,42	0,38
15,5	0,72	0,55	0,47	0,42	0,38
15,6	0,72	0,56	0,47	0,42	0,39
15,7	0,73	0,56	0,47	0,42	0,39
15,8	0,74	0,56	0,47	0,42	0,39
15,9	0,75	0,57	0,47	0,42	0,39
16	0,76	0,57	0,47	0,42	0,39
16,1	0,77	0,57	0,47	0,42	0,39
16,2	0,78	0,57	0,48	0,42	0,39
16,3	0,79	0,58	0,48	0,42	0,39
16,4	0,80	0,58	0,48	0,42	0,39
16,5	0,81	0,58	0,48	0,43	0,39
16,6	0,82	0,59	0,48	0,43	0,39
16,7	0,83	0,59	0,48	0,43	0,39
16,8	0,85	0,59	0,49	0,43	0,39
16,9	0,86	0,60	0,49	0,43	0,39
17	0,87	0,60	0,49	0,43	0,40
17,1	0,89	0,60	0,49	0,43	0,40
17,2	0,90	0,61	0,49	0,43	0,40

17,3	0,91	0,61	0,49	0,43	0,40
17,4	0,93	0,61	0,50	0,44	0,40
17,5	0,94	0,62	0,50	0,44	0,40
17,6	0,95	0,62	0,50	0,44	0,40
17,7	0,96	0,63	0,50	0,44	0,40
17,8	0,97	0,63	0,50	0,44	0,40
17,9	0,98	0,63	0,50	0,44	0,40
18	0,98	0,64	0,51	0,44	0,40
18,1	0,98	0,64	0,51	0,44	0,40
18,2	0,99	0,65	0,51	0,45	0,40
18,3	0,99	0,65	0,51	0,45	0,40
18,4	0,99	0,66	0,52	0,45	0,41
18,5	0,99	0,66	0,52	0,45	0,41
18,6	0,99	0,67	0,52	0,45	0,41
18,7	0,98	0,67	0,52	0,45	0,41
18,8	0,98	0,68	0,52	0,45	0,41
18,9	0,98	0,68	0,53	0,45	0,41
19	0,98	0,69	0,53	0,46	0,41
19,1	0,98	0,69	0,53	0,46	0,41
19,2	0,98	0,70	0,53	0,46	0,41
19,3	0,98	0,71	0,54	0,46	0,41
19,4	0,98	0,71	0,54	0,46	0,41
19,5	0,98	0,72	0,54	0,46	0,42
19,6	0,98	0,73	0,54	0,46	0,42
19,7	0,99	0,73	0,54	0,47	0,42
19,8	0,99	0,74	0,55	0,47	0,42
19,9	0,99	0,75	0,55	0,47	0,42
20	0,99	0,76	0,55	0,47	0,42
20,1	0,99	0,77	0,56	0,47	0,42
20,2	0,99	0,78	0,56	0,47	0,42

20,3	0,99	0,79	0,56	0,47	0,42
20,4	0,99	0,80	0,57	0,47	0,42
20,5	0,99	0,81	0,57	0,48	0,42
20,6	0,99	0,82	0,57	0,48	0,43
20,7	1,00	0,83	0,57	0,48	0,43
20,8	1,00	0,84	0,58	0,48	0,43
20,9	1,00	0,86	0,58	0,48	0,43
21	1,00	0,87	0,58	0,49	0,43
21,1	1,00	0,88	0,58	0,49	0,43
21,2	1,00	0,90	0,59	0,49	0,43
21,3	0,99	0,91	0,59	0,49	0,43
21,4	1,00	0,92	0,59	0,49	0,43
21,5	0,99	0,94	0,60	0,49	0,43
21,6	0,98	0,95	0,60	0,49	0,44
21,7	0,97	0,96	0,61	0,50	0,44
21,8	0,96	0,97	0,61	0,50	0,44
21,9	0,93	0,98	0,61	0,50	0,44
22	0,92	0,98	0,62	0,50	0,44
22,1	0,90	0,99	0,62	0,50	0,44
22,2	0,84	1,00	0,63	0,51	0,44
22,3	0,81	1,00	0,63	0,51	0,44
22,4	0,77	1,00	0,63	0,51	0,45
22,5	0,72	1,00	0,64	0,51	0,44
22,6	0,67	1,00	0,64	0,51	0,45
22,7	0,62	1,00	0,65	0,51	0,45
22,8	0,57	0,99	0,65	0,52	0,45
22,9	0,51	0,99	0,66	0,52	0,45
23	0,45	0,99	0,66	0,52	0,45
23,1	0,40	0,98	0,66	0,52	0,45
23,2	0,36	0,98	0,67	0,53	0,45

23,3	0,31	0,98	0,68	0,53	0,45
23,4	0,26	0,97	0,68	0,53	0,46
23,5	0,22	0,97	0,69	0,53	0,46
23,6	0,18	0,97	0,69	0,53	0,46
23,7	0,14	0,97	0,70	0,54	0,46
23,8	0,12	0,97	0,71	0,54	0,46
23,9	0,10	0,97	0,71	0,54	0,46
24	0,07	0,97	0,72	0,54	0,46
24,1	0,06	0,97	0,73	0,54	0,46
24,2	0,04	0,97	0,73	0,55	0,47
24,3	0,04	0,97	0,74	0,55	0,47
24,4	0,03	0,98	0,75	0,55	0,47
24,5	0,02	0,97	0,76	0,55	0,47
24,6	0,02	0,98	0,77	0,56	0,47
24,7	0,01	0,98	0,78	0,56	0,47
24,8	0,01	0,98	0,79	0,56	0,47
24,9	0,01	0,98	0,80	0,57	0,48
25	0,00	0,98	0,81	0,57	0,48
25,1	0,00	0,99	0,82	0,57	0,48
25,2	0,00	0,98	0,83	0,57	0,48
25,3	0,00	0,99	0,84	0,58	0,48
25,4	0,00	0,99	0,86	0,58	0,48
25,5	0,00	0,99	0,87	0,58	0,49
25,6	0,00	0,99	0,88	0,59	0,49
25,7	0,00	0,98	0,89	0,59	0,49
25,8	0,00	0,97	0,90	0,59	0,49
25,9	0,00	0,96	0,92	0,60	0,49
26	0,00	0,94	0,93	0,60	0,49
26,1	0,00	0,93	0,94	0,60	0,50
26,2	0,00	0,91	0,95	0,61	0,50

26,3	0,00	0,88	0,96	0,61	0,50
26,4	0,00	0,85	0,96	0,61	0,50
26,5	0,00	0,82	0,97	0,62	0,50
26,6	0,00	0,78	0,97	0,62	0,50
26,7	0,00	0,73	0,98	0,62	0,50
26,8	0,00	0,69	0,98	0,63	0,51
26,9	0,00	0,64	0,98	0,63	0,51
27	0,00	0,58	0,98	0,63	0,51
27,1	0,00	0,52	0,98	0,64	0,51
27,2	0,00	0,48	0,98	0,64	0,51
27,3	0,00	0,43	0,98	0,65	0,52
27,4	0,00	0,38	0,98	0,65	0,52
27,5	0,00	0,33	0,98	0,66	0,52
27,6	0,00	0,28	0,97	0,66	0,52
27,7	0,00	0,24	0,97	0,67	0,52
27,8	0,00	0,20	0,97	0,67	0,53
27,9	0,00	0,17	0,97	0,68	0,53
28	0,00	0,14	0,96	0,68	0,53
28,1	0,00	0,12	0,96	0,69	0,53
28,2	0,00	0,10	0,96	0,69	0,53
28,3	0,00	0,09	0,96	0,70	0,54
28,4	0,00	0,06	0,96	0,71	0,54
28,5	0,00	0,05	0,96	0,71	0,54
28,6	0,00	0,04	0,96	0,72	0,54
28,7	0,00	0,03	0,96	0,73	0,55
28,8	0,00	0,03	0,96	0,73	0,55
28,9	0,00	0,02	0,97	0,74	0,55
29	0,00	0,02	0,97	0,75	0,55
29,1	0,00	0,02	0,97	0,76	0,55
29,2	0,00	0,01	0,97	0,76	0,56

29,3	0,00	0,01	0,98	0,77	0,56
29,4	0,00	0,01	0,98	0,78	0,56
29,5	0,00	0,00	0,99	0,79	0,56
29,6	0,00	0,00	0,99	0,80	0,57
29,7	0,00	0,00	1,00	0,81	0,57
29,8	0,00	0,00	1,00	0,82	0,57
29,9	0,00	0,00	1,00	0,83	0,58
30	0,00	0,00	0,99	0,85	0,58
30,1	0,00	0,00	0,98	0,86	0,58
30,2	0,00	0,00	0,99	0,87	0,58
30,3	0,00	0,00	0,97	0,88	0,59
30,4	0,00	0,00	0,96	0,89	0,59
30,5	0,00	0,00	0,95	0,91	0,59
30,6	0,00	0,00	0,94	0,92	0,60
30,7	0,00	0,00	0,90	0,93	0,60
30,8	0,00	0,00	0,88	0,94	0,60
30,9	0,00	0,00	0,83	0,95	0,61
31	0,00	0,00	0,79	0,96	0,61
31,1	0,00	0,00	0,74	0,97	0,61
31,2	0,00	0,00	0,71	0,97	0,62
31,3	0,00	0,00	0,65	0,98	0,62
31,4	0,00	0,00	0,61	0,99	0,62
31,5	0,00	0,00	0,57	0,99	0,63
31,6	0,00	0,00	0,52	1,00	0,63
31,7	0,00	0,00	0,48	1,00	0,63
31,8	0,00	0,00	0,43	1,00	0,64
31,9	0,00	0,00	0,40	1,00	0,64
32	0,00	0,00	0,35	1,00	0,65
32,1	0,00	0,00	0,30	0,99	0,65
32,2	0,00	0,00	0,27	0,99	0,65

32,3	0,00	0,00	0,23	0,99	0,66
32,4	0,00	0,00	0,20	0,99	0,66
32,5	0,00	0,00	0,17	0,98	0,67
32,6	0,00	0,00	0,15	0,98	0,67
32,7	0,00	0,00	0,13	0,98	0,68
32,8	0,00	0,00	0,11	0,97	0,68
32,9	0,00	0,00	0,09	0,97	0,69
33	0,00	0,00	0,07	0,97	0,69
33,1	0,00	0,00	0,06	0,97	0,70
33,2	0,00	0,00	0,04	0,97	0,71
33,3	0,00	0,00	0,04	0,97	0,71
33,4	0,00	0,00	0,03	0,97	0,72
33,5	0,00	0,00	0,02	0,97	0,72
33,6	0,00	0,00	0,01	0,97	0,73
33,7	0,00	0,00	0,01	0,97	0,74
33,8	0,00	0,00	0,01	0,98	0,75
33,9	0,00	0,00	0,01	0,98	0,75
34	0,00	0,00	0,01	0,99	0,76
34,1	0,00	0,00	0,00	0,99	0,77
34,2	0,00	0,00	0,00	0,99	0,78
34,3	0,00	0,00	0,00	1,00	0,79
34,4	0,00	0,00	0,00	1,00	0,80
34,5	0,00	0,00	0,00	0,99	0,81
34,6	0,00	0,00	0,00	0,99	0,82
34,7	0,00	0,00	0,00	0,99	0,83
34,8	0,00	0,00	0,00	0,99	0,83
34,9	0,00	0,00	0,00	0,98	0,85
35	0,00	0,00	0,00	0,97	0,86
35,1	0,00	0,00	0,00	0,96	0,87
35,2	0,00	0,00	0,00	0,96	0,88

35,3	0,00	0,00	0,00	0,93	0,89
35,4	0,00	0,00	0,00	0,91	0,90
35,5	0,00	0,00	0,00	0,89	0,91
35,6	0,00	0,00	0,00	0,86	0,93
35,7	0,00	0,00	0,00	0,83	0,94
35,8	0,00	0,00	0,00	0,81	0,95
35,9	0,00	0,00	0,00	0,77	0,95
36	0,00	0,00	0,00	0,75	0,96
36,1	0,00	0,00	0,00	0,69	0,97
36,2	0,00	0,00	0,00	0,65	0,98
36,3	0,00	0,00	0,00	0,61	0,99
36,4	0,00	0,00	0,00	0,56	0,99
36,5	0,00	0,00	0,00	0,51	0,99
36,6	0,00	0,00	0,00	0,47	1,00
36,7	0,00	0,00	0,00	0,42	1,00
36,8	0,00	0,00	0,00	0,38	1,00
36,9	0,00	0,00	0,00	0,33	1,00
37	0,00	0,00	0,00	0,29	1,00
37,1	0,00	0,00	0,00	0,27	1,00
37,2	0,00	0,00	0,00	0,24	1,00
37,3	0,00	0,00	0,00	0,21	1,00
37,4	0,00	0,00	0,00	0,19	0,99
37,5	0,00	0,00	0,00	0,17	0,99
37,6	0,00	0,00	0,00	0,15	0,99
37,7	0,00	0,00	0,00	0,12	0,99
37,8	0,00	0,00	0,00	0,10	0,98
37,9	0,00	0,00	0,00	0,08	0,98
38	0,00	0,00	0,00	0,07	0,98
38,1	0,00	0,00	0,00	0,05	0,98
38,2	0,00	0,00	0,00	0,04	0,97

38,3	0,00	0,00	0,00	0,04	0,97
38,4	0,00	0,00	0,00	0,03	0,97
38,5	0,00	0,00	0,00	0,02	0,97
38,6	0,00	0,00	0,00	0,02	0,97
38,7	0,00	0,00	0,00	0,01	0,98
38,8	0,00	0,00	0,00	0,01	0,98
38,9	0,00	0,00	0,00	0,01	0,98
39	0,00	0,00	0,00	0,01	0,98
39,1	0,00	0,00	0,00	0,01	0,98
39,2	0,00	0,00	0,00	0,01	0,98
39,3	0,00	0,00	0,00	0,01	0,98
39,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99
39,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99
39,6	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
39,7	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00
39,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99
39,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98
40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98
40,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,97
40,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,97
40,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,95
40,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,93
40,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,91
40,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,90
40,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,88
40,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,86
40,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,83
41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80
41,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,76
41,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,72

41,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67
41,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,63
41,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,58
41,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,55
41,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,49
41,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,46
41,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41
42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,36
42,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32
42,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,29
42,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26
42,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,24
42,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20
42,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,18
42,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15
42,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13
42,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11
43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09
43,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,08
43,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,07
43,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
43,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05
43,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04
43,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
43,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
43,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
43,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
44,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
44,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01

44,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
44,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
44,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
44,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
44,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
44,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
44,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

4.2 Symulacje rzeczywistego modulatora energii.

4.2.1 Rozkłady dawki na głębokości dla wiązek prtotonów, które przeszły przez różne grubości absorbenta PMMA

Tabela 4.7: Rozkłady dawki na głębokości dla wiązek, które przeszły przez różne grubości absorbenta (wiązki od 1 do 9).

Głębokość [mm]	Grubość absorbenta [mm]								
	0	0,8	1,61	2,42	3,23	4,03	4,84	5,64	6,45
0,1	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23
0,2	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,23	0,23
0,3	0,20	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23
0,4	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,23	0,23
0,5	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23
0,6	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23
0,7	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23
0,8	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23
0,9	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23
1,0	0,20	0,20	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23
1,1	0,20	0,21	0,22	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23

1,2	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,24
1,3	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,24
1,4	0,20	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,24
1,5	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,24
1,6	0,21	0,20	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24
1,7	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,24
1,8	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,24
1,9	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,24	0,24
2,0	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24
2,1	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24
2,2	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,24	0,24
2,3	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,24	0,24
2,4	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,25
2,5	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,24	0,24
2,6	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,24	0,24
2,7	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24
2,8	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24
2,9	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24
3,0	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,25
3,1	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24
3,2	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,24	0,24	0,24
3,3	0,21	0,22	0,22	0,23	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24
3,4	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24
3,5	0,21	0,22	0,22	0,23	0,22	0,23	0,23	0,24	0,25
3,6	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25
3,7	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,25	0,25
3,8	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,26
3,9	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,25
4,0	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,25	0,25
4,1	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25

4,2	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,25	0,25
4,3	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,26
4,4	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,25	0,25
4,5	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,25	0,25
4,6	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,25	0,25	0,26
4,7	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25
4,8	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24	0,25	0,26
4,9	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24	0,25	0,26
5,0	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24	0,25	0,26
5,1	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,26
5,2	0,22	0,22	0,23	0,24	0,23	0,24	0,24	0,26	0,25
5,3	0,22	0,22	0,23	0,24	0,23	0,24	0,24	0,25	0,26
5,4	0,22	0,22	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,25	0,26
5,5	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,26	0,26
5,6	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,25	0,24	0,25	0,26
5,7	0,23	0,22	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26
5,8	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26
5,9	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,27
6,0	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,26	0,27
6,1	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,26	0,27
6,2	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,26	0,26
6,3	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26
6,4	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27
6,5	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26
6,6	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26
6,7	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27
6,8	0,22	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,25	0,26	0,27
6,9	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27
7,0	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,27	0,27
7,1	0,23	0,23	0,24	0,25	0,24	0,25	0,25	0,27	0,28

7,2	0,23	0,23	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,27
7,3	0,23	0,23	0,24	0,25	0,25	0,25	0,26	0,27	0,27
7,4	0,23	0,23	0,24	0,25	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28
7,5	0,23	0,23	0,24	0,25	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28
7,6	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28
7,7	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28
7,8	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28
7,9	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28
8,0	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28
8,1	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,29
8,2	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,29
8,3	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,28	0,29
8,4	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28
8,5	0,23	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,28	0,29
8,6	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,28	0,29
8,7	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,28	0,29
8,8	0,23	0,24	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29
8,9	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	0,27	0,28	0,29
9,0	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,30
9,1	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29
9,2	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,30
9,3	0,24	0,24	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,29	0,30
9,4	0,24	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,30
9,5	0,24	0,24	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,30
9,6	0,24	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,30
9,7	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,30
9,8	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
9,9	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
10,0	0,24	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,31
10,1	0,24	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30

10,2	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,31
10,3	0,25	0,25	0,25	0,26	0,27	0,27	0,28	0,29	0,31
10,4	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,30	0,31
10,5	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,29	0,31
10,6	0,25	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28	0,29	0,31
10,7	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,29	0,31
10,8	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,28	0,30	0,31
10,9	0,25	0,25	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,30	0,32
11,0	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,32
11,1	0,25	0,25	0,26	0,27	0,27	0,28	0,29	0,30	0,32
11,2	0,25	0,25	0,26	0,27	0,27	0,28	0,29	0,31	0,32
11,3	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28	0,29	0,30	0,32
11,4	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28	0,29	0,31	0,32
11,5	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28	0,29	0,31	0,33
11,6	0,25	0,25	0,26	0,27	0,27	0,28	0,29	0,31	0,33
11,7	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28	0,30	0,31	0,33
11,8	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,29	0,31	0,33
11,9	0,25	0,26	0,26	0,28	0,28	0,29	0,29	0,32	0,33
12,0	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28	0,29	0,30	0,32	0,33
12,1	0,25	0,26	0,27	0,27	0,28	0,29	0,30	0,32	0,34
12,2	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28	0,29	0,30	0,32	0,34
12,3	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28	0,29	0,30	0,32	0,34
12,4	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28	0,29	0,30	0,32	0,34
12,5	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,30	0,33	0,34
12,6	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,31	0,31	0,33	0,34
12,7	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,33	0,35
12,8	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,33	0,35
12,9	0,26	0,26	0,27	0,29	0,29	0,30	0,31	0,33	0,36
13,0	0,27	0,26	0,28	0,29	0,29	0,30	0,31	0,33	0,36
13,1	0,26	0,26	0,27	0,29	0,29	0,30	0,31	0,33	0,36

13,2	0,26	0,27	0,27	0,29	0,30	0,30	0,32	0,33	0,36
13,3	0,26	0,27	0,27	0,29	0,30	0,30	0,32	0,34	0,36
13,4	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,34	0,36
13,5	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,34	0,37
13,6	0,27	0,27	0,27	0,29	0,29	0,31	0,32	0,34	0,37
13,7	0,27	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,34	0,38
13,8	0,27	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,33	0,35	0,38
13,9	0,27	0,28	0,28	0,29	0,30	0,31	0,33	0,35	0,38
14,0	0,27	0,27	0,28	0,29	0,30	0,32	0,33	0,35	0,38
14,1	0,26	0,28	0,28	0,29	0,30	0,31	0,33	0,35	0,38
14,2	0,27	0,27	0,29	0,29	0,30	0,32	0,33	0,36	0,39
14,3	0,27	0,27	0,29	0,29	0,31	0,32	0,33	0,36	0,39
14,4	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,34	0,36	0,40
14,5	0,27	0,27	0,29	0,30	0,31	0,32	0,34	0,36	0,40
14,6	0,27	0,27	0,29	0,30	0,31	0,32	0,34	0,37	0,40
14,7	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,34	0,37	0,41
14,8	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,33	0,35	0,37	0,41
14,9	0,27	0,28	0,30	0,31	0,31	0,33	0,35	0,38	0,41
15,0	0,28	0,28	0,29	0,31	0,32	0,33	0,35	0,38	0,42
15,1	0,28	0,28	0,30	0,31	0,32	0,34	0,36	0,38	0,42
15,2	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,34	0,36	0,38	0,43
15,3	0,28	0,28	0,30	0,31	0,32	0,34	0,36	0,39	0,43
15,4	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,34	0,36	0,39	0,44
15,5	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,34	0,37	0,40	0,44
15,6	0,28	0,29	0,30	0,31	0,33	0,35	0,36	0,40	0,44
15,7	0,28	0,29	0,30	0,32	0,33	0,35	0,37	0,40	0,45
15,8	0,28	0,28	0,30	0,31	0,33	0,35	0,37	0,40	0,46
15,9	0,29	0,29	0,30	0,32	0,33	0,35	0,37	0,41	0,46
16,0	0,28	0,29	0,31	0,32	0,33	0,36	0,38	0,41	0,47
16,1	0,28	0,29	0,31	0,32	0,33	0,36	0,38	0,42	0,47

16,2	0,29	0,30	0,31	0,32	0,34	0,36	0,39	0,42	0,48
16,3	0,29	0,29	0,31	0,32	0,34	0,36	0,39	0,43	0,48
16,4	0,29	0,30	0,31	0,33	0,34	0,37	0,39	0,44	0,49
16,5	0,29	0,30	0,32	0,33	0,34	0,37	0,40	0,44	0,50
16,6	0,29	0,30	0,32	0,33	0,35	0,37	0,40	0,44	0,50
16,7	0,29	0,30	0,32	0,33	0,35	0,37	0,41	0,45	0,51
16,8	0,29	0,30	0,32	0,34	0,35	0,38	0,41	0,45	0,52
16,9	0,29	0,31	0,32	0,34	0,35	0,38	0,41	0,46	0,53
17,0	0,30	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,42	0,46	0,54
17,1	0,29	0,30	0,32	0,34	0,36	0,39	0,42	0,47	0,55
17,2	0,30	0,31	0,33	0,34	0,36	0,39	0,42	0,48	0,56
17,3	0,30	0,31	0,33	0,34	0,36	0,40	0,43	0,48	0,57
17,4	0,30	0,31	0,33	0,34	0,37	0,40	0,43	0,49	0,58
17,5	0,30	0,31	0,33	0,35	0,37	0,40	0,44	0,50	0,60
17,6	0,30	0,31	0,33	0,35	0,37	0,40	0,44	0,51	0,62
17,7	0,30	0,32	0,33	0,35	0,37	0,41	0,45	0,51	0,64
17,8	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,41	0,46	0,52	0,66
17,9	0,31	0,32	0,34	0,36	0,38	0,41	0,46	0,53	0,68
18,0	0,31	0,32	0,34	0,36	0,39	0,42	0,47	0,54	0,70
18,1	0,31	0,32	0,34	0,36	0,39	0,43	0,47	0,55	0,73
18,2	0,31	0,32	0,34	0,37	0,39	0,43	0,48	0,57	0,76
18,3	0,31	0,32	0,34	0,37	0,40	0,43	0,49	0,58	0,79
18,4	0,31	0,32	0,35	0,37	0,40	0,44	0,50	0,59	0,83
18,5	0,31	0,33	0,35	0,37	0,40	0,45	0,50	0,61	0,88
18,6	0,32	0,33	0,35	0,38	0,41	0,45	0,51	0,63	0,92
18,7	0,32	0,33	0,35	0,38	0,41	0,46	0,52	0,65	0,96
18,8	0,32	0,33	0,35	0,39	0,42	0,46	0,52	0,67	1,00
18,9	0,32	0,33	0,36	0,39	0,42	0,47	0,53	0,69	1,00
19,0	0,32	0,33	0,36	0,39	0,42	0,47	0,54	0,72	0,99
19,1	0,32	0,33	0,36	0,39	0,42	0,48	0,55	0,75	0,94

19,2	0,33	0,34	0,37	0,40	0,43	0,48	0,57	0,78	0,87
19,3	0,33	0,34	0,37	0,40	0,44	0,49	0,58	0,81	0,75
19,4	0,33	0,34	0,37	0,40	0,44	0,50	0,59	0,85	0,63
19,5	0,33	0,34	0,37	0,41	0,45	0,51	0,61	0,90	0,47
19,6	0,34	0,35	0,37	0,41	0,45	0,52	0,63	0,94	0,36
19,7	0,33	0,35	0,38	0,42	0,46	0,53	0,65	0,98	0,24
19,8	0,34	0,36	0,38	0,42	0,46	0,54	0,67	1,00	0,15
19,9	0,34	0,36	0,39	0,43	0,47	0,55	0,70	1,00	0,09
20,0	0,34	0,36	0,39	0,43	0,48	0,56	0,73	0,96	0,05
20,1	0,34	0,36	0,39	0,44	0,48	0,57	0,76	0,91	0,03
20,2	0,34	0,37	0,40	0,44	0,49	0,58	0,79	0,80	0,01
20,3	0,35	0,37	0,40	0,45	0,49	0,60	0,83	0,68	0,01
20,4	0,35	0,37	0,40	0,45	0,50	0,62	0,87	0,54	0,00
20,5	0,36	0,37	0,41	0,46	0,51	0,63	0,91	0,41	0,00
20,6	0,35	0,37	0,41	0,46	0,52	0,65	0,95	0,29	0,00
20,7	0,36	0,38	0,41	0,47	0,53	0,67	0,99	0,19	0,00
20,8	0,36	0,38	0,42	0,47	0,53	0,69	1,00	0,11	0,00
20,9	0,36	0,38	0,42	0,47	0,55	0,72	1,00	0,06	0,00
21,0	0,36	0,39	0,43	0,48	0,56	0,75	0,94	0,03	0,00
21,1	0,37	0,39	0,43	0,49	0,57	0,78	0,87	0,01	0,00
21,2	0,37	0,40	0,44	0,49	0,58	0,81	0,75	0,01	0,00
21,3	0,37	0,40	0,44	0,50	0,60	0,85	0,61	0,00	0,00
21,4	0,38	0,40	0,45	0,51	0,62	0,90	0,47	0,00	0,00
21,5	0,38	0,41	0,45	0,52	0,64	0,94	0,35	0,00	0,00
21,6	0,38	0,41	0,46	0,53	0,65	0,97	0,24	0,00	0,00
21,7	0,38	0,41	0,46	0,53	0,67	1,00	0,16	0,00	0,00
21,8	0,39	0,42	0,47	0,54	0,70	0,99	0,09	0,00	0,00
21,9	0,39	0,42	0,47	0,55	0,72	0,97	0,05	0,00	0,00
22,0	0,39	0,43	0,48	0,57	0,76	0,91	0,03	0,00	0,00
22,1	0,40	0,43	0,49	0,58	0,79	0,82	0,02	0,00	0,00

22,2	0,41	0,44	0,50	0,59	0,83	0,69	0,01	0,00	0,00
22,3	0,41	0,44	0,50	0,61	0,87	0,57	0,00	0,00	0,00
22,4	0,41	0,45	0,51	0,63	0,91	0,43	0,00	0,00	0,00
22,5	0,41	0,45	0,52	0,65	0,96	0,30	0,00	0,00	0,00
22,6	0,42	0,45	0,53	0,67	0,98	0,21	0,00	0,00	0,00
22,7	0,42	0,46	0,54	0,69	1,00	0,13	0,00	0,00	0,00
22,8	0,42	0,46	0,55	0,72	0,99	0,07	0,00	0,00	0,00
22,9	0,43	0,47	0,56	0,74	0,96	0,03	0,00	0,00	0,00
23,0	0,44	0,48	0,57	0,77	0,88	0,02	0,00	0,00	0,00
23,1	0,44	0,49	0,59	0,81	0,77	0,01	0,00	0,00	0,00
23,2	0,44	0,49	0,60	0,85	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00
23,3	0,45	0,50	0,62	0,90	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00
23,4	0,45	0,51	0,64	0,94	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00
23,5	0,46	0,52	0,66	0,97	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00
23,6	0,46	0,53	0,68	1,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00
23,7	0,47	0,54	0,70	1,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
23,8	0,48	0,55	0,73	0,99	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
23,9	0,48	0,56	0,76	0,91	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
24,0	0,49	0,57	0,79	0,81	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
24,1	0,49	0,59	0,84	0,69	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
24,2	0,50	0,60	0,88	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24,3	0,51	0,62	0,92	0,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24,4	0,52	0,64	0,96	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24,5	0,53	0,66	0,99	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24,6	0,54	0,68	1,00	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24,7	0,55	0,70	0,99	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24,8	0,56	0,73	0,95	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24,9	0,57	0,76	0,88	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25,0	0,59	0,80	0,76	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25,1	0,60	0,84	0,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

25,2	0,61	0,88	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25,3	0,63	0,92	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25,4	0,65	0,95	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25,5	0,67	0,99	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25,6	0,70	1,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25,7	0,73	0,98	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25,8	0,75	0,93	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25,9	0,79	0,82	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26,0	0,82	0,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26,1	0,86	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26,2	0,91	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26,3	0,95	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26,4	0,97	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26,5	1,00	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26,6	1,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26,7	0,95	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26,8	0,88	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26,9	0,79	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27,0	0,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27,1	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27,2	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27,3	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27,4	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27,5	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27,6	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27,7	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27,8	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27,9	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

28,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabela 4.8: Rozkłady dawki na głębokości dla wiązek, które przeszły przez różne grubości absorbenta (wiązki od 10 do 17).

Głębokość [mm]	Grubość absorbenta [mm]							
	7,25	8,06	8,87	9,68	10,48	11,29	12,1	12,9
0,1	0,23	0,23	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26
0,2	0,23	0,23	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26
0,3	0,24	0,23	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	0,26
0,4	0,23	0,23	0,25	0,25	0,25	0,26	0,27	0,26
0,5	0,23	0,23	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,26
0,6	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	0,26
0,7	0,24	0,23	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	0,26
0,8	0,24	0,24	0,26	0,25	0,26	0,26	0,27	0,26
0,9	0,24	0,23	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,26
1,0	0,24	0,23	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,26
1,1	0,24	0,23	0,25	0,25	0,25	0,27	0,28	0,27
1,2	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,27
1,3	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,27
1,4	0,24	0,24	0,26	0,25	0,26	0,27	0,28	0,27
1,5	0,24	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,27

1,6	0,24	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,27
1,7	0,24	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,27
1,8	0,24	0,24	0,25	0,26	0,26	0,28	0,28	0,27
1,9	0,24	0,24	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,27
2,0	0,24	0,24	0,26	0,26	0,26	0,27	0,28	0,27
2,1	0,24	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28	0,27
2,2	0,24	0,24	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,28
2,3	0,25	0,24	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,28
2,4	0,24	0,24	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,28
2,5	0,25	0,24	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,28
2,6	0,25	0,24	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,28
2,7	0,25	0,24	0,26	0,27	0,27	0,28	0,29	0,29
2,8	0,25	0,25	0,26	0,27	0,27	0,29	0,29	0,29
2,9	0,25	0,25	0,26	0,27	0,27	0,28	0,29	0,29
3,0	0,25	0,25	0,26	0,27	0,27	0,29	0,29	0,29
3,1	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,29
3,2	0,25	0,24	0,26	0,27	0,27	0,29	0,30	0,29
3,3	0,25	0,25	0,26	0,28	0,28	0,29	0,30	0,29
3,4	0,25	0,25	0,27	0,28	0,28	0,29	0,30	0,29
3,5	0,25	0,25	0,27	0,27	0,28	0,29	0,30	0,30
3,6	0,25	0,25	0,26	0,28	0,29	0,29	0,30	0,30
3,7	0,25	0,25	0,27	0,27	0,28	0,29	0,30	0,30
3,8	0,25	0,25	0,27	0,27	0,28	0,29	0,30	0,30
3,9	0,26	0,25	0,27	0,28	0,28	0,30	0,31	0,30
4,0	0,25	0,26	0,27	0,27	0,29	0,30	0,31	0,30
4,1	0,26	0,25	0,27	0,27	0,28	0,30	0,31	0,30
4,2	0,26	0,25	0,27	0,27	0,28	0,30	0,32	0,31
4,3	0,26	0,25	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,31
4,4	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,32	0,31
4,5	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29	0,31	0,32	0,31

4,6	0,26	0,26	0,27	0,29	0,29	0,31	0,31	0,31
4,7	0,26	0,26	0,27	0,28	0,30	0,31	0,32	0,31
4,8	0,26	0,26	0,28	0,29	0,29	0,31	0,32	0,31
4,9	0,26	0,26	0,28	0,28	0,30	0,31	0,32	0,32
5,0	0,26	0,26	0,28	0,28	0,29	0,31	0,32	0,32
5,1	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,32	0,33	0,32
5,2	0,27	0,27	0,28	0,29	0,30	0,31	0,33	0,32
5,3	0,26	0,26	0,28	0,29	0,30	0,31	0,33	0,33
5,4	0,27	0,27	0,28	0,30	0,30	0,31	0,33	0,33
5,5	0,27	0,27	0,28	0,29	0,31	0,32	0,33	0,33
5,6	0,27	0,27	0,29	0,29	0,30	0,32	0,33	0,33
5,7	0,27	0,27	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,33
5,8	0,27	0,27	0,29	0,30	0,31	0,32	0,34	0,34
5,9	0,27	0,27	0,29	0,30	0,31	0,32	0,34	0,34
6,0	0,27	0,27	0,29	0,30	0,31	0,32	0,35	0,34
6,1	0,27	0,27	0,29	0,30	0,31	0,33	0,35	0,34
6,2	0,27	0,27	0,29	0,30	0,31	0,33	0,35	0,35
6,3	0,27	0,27	0,29	0,30	0,31	0,33	0,35	0,35
6,4	0,27	0,28	0,29	0,31	0,32	0,33	0,35	0,35
6,5	0,28	0,27	0,30	0,30	0,32	0,33	0,36	0,35
6,6	0,27	0,27	0,30	0,30	0,32	0,33	0,36	0,36
6,7	0,27	0,27	0,30	0,31	0,32	0,34	0,36	0,36
6,8	0,28	0,28	0,30	0,31	0,32	0,34	0,37	0,36
6,9	0,28	0,28	0,30	0,31	0,32	0,34	0,36	0,36
7,0	0,28	0,28	0,30	0,31	0,33	0,35	0,37	0,37
7,1	0,28	0,28	0,30	0,32	0,33	0,35	0,37	0,37
7,2	0,28	0,28	0,30	0,31	0,33	0,35	0,37	0,37
7,3	0,29	0,28	0,30	0,32	0,33	0,36	0,38	0,38
7,4	0,28	0,28	0,31	0,32	0,33	0,35	0,38	0,38
7,5	0,28	0,28	0,31	0,32	0,34	0,36	0,38	0,38

7,6	0,29	0,29	0,31	0,32	0,34	0,36	0,39	0,38
7,7	0,29	0,29	0,31	0,32	0,34	0,36	0,39	0,39
7,8	0,29	0,29	0,31	0,33	0,34	0,37	0,40	0,39
7,9	0,29	0,29	0,32	0,33	0,34	0,37	0,40	0,39
8,0	0,29	0,29	0,31	0,33	0,35	0,37	0,41	0,40
8,1	0,29	0,29	0,32	0,33	0,35	0,37	0,41	0,40
8,2	0,30	0,29	0,32	0,33	0,35	0,37	0,41	0,41
8,3	0,29	0,30	0,32	0,33	0,35	0,38	0,41	0,41
8,4	0,29	0,30	0,32	0,34	0,36	0,38	0,41	0,41
8,5	0,30	0,30	0,32	0,34	0,35	0,38	0,42	0,42
8,6	0,30	0,30	0,32	0,34	0,36	0,39	0,42	0,42
8,7	0,29	0,30	0,32	0,34	0,36	0,39	0,43	0,43
8,8	0,30	0,30	0,32	0,34	0,37	0,40	0,43	0,43
8,9	0,30	0,30	0,33	0,35	0,37	0,40	0,44	0,44
9,0	0,30	0,31	0,33	0,35	0,37	0,40	0,44	0,45
9,1	0,30	0,31	0,33	0,35	0,38	0,40	0,45	0,45
9,2	0,30	0,31	0,34	0,36	0,38	0,41	0,45	0,46
9,3	0,30	0,31	0,34	0,36	0,38	0,41	0,46	0,46
9,4	0,31	0,31	0,34	0,36	0,38	0,42	0,46	0,47
9,5	0,31	0,31	0,34	0,36	0,39	0,42	0,47	0,48
9,6	0,31	0,31	0,35	0,37	0,39	0,43	0,48	0,49
9,7	0,31	0,31	0,35	0,37	0,39	0,44	0,49	0,49
9,8	0,31	0,32	0,34	0,37	0,40	0,44	0,49	0,50
9,9	0,31	0,32	0,35	0,37	0,40	0,44	0,50	0,51
10,0	0,31	0,32	0,35	0,37	0,40	0,45	0,51	0,52
10,1	0,31	0,32	0,36	0,37	0,41	0,46	0,51	0,53
10,2	0,32	0,32	0,35	0,38	0,41	0,46	0,52	0,54
10,3	0,32	0,33	0,36	0,38	0,42	0,46	0,53	0,56
10,4	0,32	0,33	0,36	0,38	0,42	0,47	0,54	0,57
10,5	0,32	0,33	0,37	0,39	0,43	0,48	0,56	0,58

10,6	0,32	0,33	0,37	0,39	0,43	0,48	0,57	0,60
10,7	0,32	0,33	0,37	0,40	0,44	0,49	0,59	0,62
10,8	0,33	0,34	0,37	0,40	0,44	0,50	0,60	0,64
10,9	0,33	0,34	0,38	0,40	0,44	0,51	0,62	0,66
11,0	0,33	0,34	0,38	0,41	0,45	0,52	0,63	0,68
11,1	0,33	0,35	0,38	0,41	0,46	0,52	0,65	0,71
11,2	0,33	0,34	0,39	0,42	0,46	0,54	0,68	0,75
11,3	0,33	0,35	0,39	0,42	0,47	0,55	0,70	0,78
11,4	0,34	0,35	0,39	0,42	0,47	0,56	0,73	0,82
11,5	0,34	0,35	0,40	0,43	0,48	0,57	0,76	0,85
11,6	0,34	0,36	0,40	0,44	0,48	0,58	0,79	0,89
11,7	0,35	0,36	0,41	0,44	0,49	0,60	0,83	0,93
11,8	0,34	0,36	0,41	0,44	0,49	0,61	0,87	0,96
11,9	0,35	0,36	0,41	0,45	0,50	0,63	0,92	0,99
12,0	0,35	0,37	0,41	0,46	0,51	0,65	0,95	1,00
12,1	0,35	0,37	0,41	0,46	0,52	0,67	0,99	0,98
12,2	0,36	0,38	0,42	0,47	0,53	0,68	1,00	0,96
12,3	0,36	0,38	0,43	0,47	0,54	0,72	0,99	0,91
12,4	0,36	0,38	0,43	0,48	0,56	0,74	0,93	0,85
12,5	0,36	0,38	0,43	0,49	0,57	0,78	0,86	0,75
12,6	0,36	0,38	0,44	0,49	0,58	0,81	0,75	0,66
12,7	0,37	0,39	0,45	0,50	0,60	0,86	0,62	0,54
12,8	0,37	0,39	0,45	0,51	0,61	0,89	0,48	0,44
12,9	0,38	0,40	0,45	0,52	0,63	0,94	0,36	0,34
13,0	0,38	0,40	0,46	0,52	0,65	0,98	0,25	0,25
13,1	0,38	0,41	0,47	0,53	0,67	1,00	0,17	0,17
13,2	0,38	0,41	0,47	0,54	0,70	1,00	0,11	0,10
13,3	0,39	0,41	0,47	0,55	0,72	0,97	0,07	0,07
13,4	0,39	0,42	0,48	0,57	0,75	0,92	0,04	0,04
13,5	0,39	0,42	0,49	0,58	0,79	0,84	0,02	0,02

13,6	0,40	0,43	0,49	0,60	0,83	0,71	0,01	0,01
13,7	0,40	0,43	0,50	0,61	0,86	0,57	0,01	0,01
13,8	0,41	0,44	0,51	0,63	0,91	0,43	0,00	0,00
13,9	0,41	0,44	0,52	0,64	0,94	0,31	0,00	0,00
14,0	0,41	0,45	0,53	0,66	0,98	0,22	0,00	0,00
14,1	0,42	0,45	0,54	0,69	1,00	0,15	0,00	0,00
14,2	0,42	0,46	0,55	0,71	0,99	0,09	0,00	0,00
14,3	0,42	0,46	0,56	0,73	0,96	0,05	0,00	0,00
14,4	0,43	0,47	0,57	0,77	0,90	0,03	0,00	0,00
14,5	0,43	0,48	0,58	0,80	0,78	0,02	0,00	0,00
14,6	0,44	0,49	0,60	0,84	0,64	0,01	0,00	0,00
14,7	0,44	0,49	0,62	0,89	0,51	0,00	0,00	0,00
14,8	0,45	0,50	0,64	0,93	0,38	0,00	0,00	0,00
14,9	0,45	0,51	0,66	0,96	0,27	0,00	0,00	0,00
15,0	0,46	0,52	0,68	0,98	0,18	0,00	0,00	0,00
15,1	0,46	0,53	0,70	1,00	0,11	0,00	0,00	0,00
15,2	0,47	0,54	0,73	0,99	0,07	0,00	0,00	0,00
15,3	0,48	0,55	0,76	0,97	0,04	0,00	0,00	0,00
15,4	0,48	0,56	0,79	0,87	0,02	0,00	0,00	0,00
15,5	0,49	0,57	0,83	0,74	0,01	0,00	0,00	0,00
15,6	0,49	0,59	0,87	0,60	0,01	0,00	0,00	0,00
15,7	0,50	0,61	0,91	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00
15,8	0,51	0,63	0,97	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00
15,9	0,52	0,65	0,99	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00
16,0	0,53	0,67	1,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00
16,1	0,54	0,69	1,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00
16,2	0,55	0,72	0,95	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00
16,3	0,56	0,75	0,89	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
16,4	0,57	0,79	0,80	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
16,5	0,59	0,83	0,66	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00

16,6	0,60	0,87	0,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16,7	0,62	0,91	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16,8	0,65	0,96	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16,9	0,67	0,98	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17,0	0,69	1,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17,1	0,72	0,98	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17,2	0,74	0,92	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17,3	0,78	0,84	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17,4	0,81	0,73	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17,5	0,86	0,59	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17,6	0,90	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17,7	0,94	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17,8	0,97	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17,9	1,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18,0	1,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18,1	0,96	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18,2	0,90	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18,3	0,80	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18,4	0,67	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18,5	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18,6	0,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18,7	0,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18,8	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18,9	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19,0	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19,1	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19,2	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

19,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19,7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19,9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

4.2.2 Symulacje poszerzonego piku Bragga.

Tabela 4.9: Symulacje rzeczywistego poszerzonego piku Bragga w dwóch wariantach: z uwzględnieniem wskazania komory przelotowej i bez uwzględnienia komory przelotowej jako czynnego elementu monitorującego wiązkę protonów.

Głębokość [mm]	Bez komory przelotowej	Z uwzględnieniem komory przelotowej
0,1	0,61	0,65
0,2	0,61	0,65
0,3	0,62	0,65
0,4	0,62	0,65
0,5	0,62	0,65
0,6	0,62	0,65
0,7	0,62	0,65
0,8	0,62	0,66
0,9	0,62	0,66
1	0,62	0,66
1,1	0,62	0,66
1,2	0,63	0,66
1,3	0,63	0,67
1,4	0,63	0,66
1,5	0,63	0,66
1,6	0,63	0,66
1,7	0,63	0,67

1,8	0,63	0,67
1,9	0,64	0,67
2	0,64	0,67
2,1	0,64	0,68
2,2	0,64	0,67
2,3	0,64	0,68
2,4	0,64	0,68
2,5	0,64	0,68
2,6	0,65	0,68
2,7	0,65	0,68
2,8	0,65	0,68
2,9	0,65	0,68
3	0,65	0,69
3,1	0,65	0,69
3,2	0,65	0,69
3,3	0,66	0,69
3,4	0,66	0,69
3,5	0,66	0,7
3,6	0,66	0,7
3,7	0,66	0,7
3,8	0,66	0,7
3,9	0,67	0,7
4	0,67	0,71
4,1	0,67	0,71
4,2	0,67	0,71
4,3	0,67	0,71
4,4	0,68	0,72
4,5	0,68	0,71
4,6	0,68	0,72
4,7	0,68	0,72

4,8	0,68	0,72
4,9	0,69	0,72
5	0,69	0,72
5,1	0,69	0,73
5,2	0,69	0,73
5,3	0,69	0,73
5,4	0,7	0,73
5,5	0,7	0,74
5,6	0,7	0,73
5,7	0,7	0,74
5,8	0,7	0,74
5,9	0,71	0,74
6	0,71	0,74
6,1	0,71	0,74
6,2	0,71	0,75
6,3	0,71	0,75
6,4	0,72	0,75
6,5	0,72	0,75
6,6	0,72	0,75
6,7	0,73	0,76
6,8	0,72	0,76
6,9	0,73	0,76
7	0,73	0,76
7,1	0,73	0,77
7,2	0,73	0,77
7,3	0,74	0,77
7,4	0,74	0,78
7,5	0,74	0,78
7,6	0,74	0,78
7,7	0,75	0,78

7,8	0,75	0,79
7,9	0,75	0,79
8	0,76	0,79
8,1	0,76	0,8
8,2	0,76	0,79
8,3	0,77	0,8
8,4	0,77	0,8
8,5	0,77	0,8
8,6	0,77	0,8
8,7	0,78	0,81
8,8	0,78	0,81
8,9	0,78	0,82
9	0,79	0,82
9,1	0,79	0,82
9,2	0,8	0,83
9,3	0,8	0,83
9,4	0,8	0,83
9,5	0,81	0,84
9,6	0,81	0,84
9,7	0,82	0,85
9,8	0,82	0,85
9,9	0,82	0,85
10	0,83	0,85
10,1	0,83	0,85
10,2	0,83	0,86
10,3	0,84	0,87
10,4	0,85	0,87
10,5	0,85	0,87
10,6	0,85	0,88
10,7	0,86	0,88

10,8	0,87	0,89
10,9	0,87	0,89
11	0,88	0,9
11,1	0,88	0,9
11,2	0,89	0,91
11,3	0,9	0,92
11,4	0,91	0,93
11,5	0,92	0,93
11,6	0,93	0,94
11,7	0,94	0,95
11,8	0,95	0,95
11,9	0,96	0,96
12	0,97	0,97
12,1	0,98	0,99
12,2	0,99	0,99
12,3	1	1
12,4	1	1
12,5	1	1
12,6	0,99	0,99
12,7	0,99	0,99
12,8	0,98	0,99
12,9	0,98	0,99
13	0,97	0,99
13,1	0,97	0,98
13,2	0,97	0,99
13,3	0,98	0,99
13,4	0,97	0,99
13,5	0,97	0,99
13,6	0,96	0,98
13,7	0,96	0,98

13,8	0,95	0,98
13,9	0,95	0,98
14	0,95	0,98
14,1	0,95	0,98
14,2	0,95	0,98
14,3	0,95	0,98
14,4	0,95	0,99
14,5	0,95	0,99
14,6	0,94	0,98
14,7	0,94	0,98
14,8	0,93	0,98
14,9	0,93	0,97
15	0,93	0,97
15,1	0,93	0,98
15,2	0,93	0,98
15,3	0,93	0,98
15,4	0,93	0,98
15,5	0,92	0,97
15,6	0,92	0,97
15,7	0,91	0,97
15,8	0,91	0,97
15,9	0,9	0,97
16	0,9	0,97
16,1	0,91	0,97
16,2	0,9	0,97
16,3	0,9	0,97
16,4	0,9	0,97
16,5	0,9	0,97
16,6	0,89	0,96
16,7	0,89	0,96

16,8	0,89	0,97
16,9	0,89	0,97
17	0,89	0,96
17,1	0,89	0,97
17,2	0,89	0,97
17,3	0,88	0,97
17,4	0,88	0,96
17,5	0,87	0,96
17,6	0,87	0,96
17,7	0,87	0,96
17,8	0,87	0,96
17,9	0,86	0,96
18	0,87	0,96
18,1	0,87	0,96
18,2	0,86	0,96
18,3	0,86	0,96
18,4	0,86	0,96
18,5	0,85	0,95
18,6	0,85	0,95
18,7	0,85	0,95
18,8	0,85	0,96
18,9	0,84	0,95
19	0,84	0,96
19,1	0,84	0,96
19,2	0,84	0,96
19,3	0,84	0,96
19,4	0,84	0,95
19,5	0,83	0,95
19,6	0,83	0,95
19,7	0,83	0,95

19,8	0,83	0,95
19,9	0,83	0,96
20	0,83	0,96
20,1	0,83	0,96
20,2	0,82	0,95
20,3	0,82	0,96
20,4	0,82	0,95
20,5	0,81	0,95
20,6	0,81	0,95
20,7	0,81	0,95
20,8	0,81	0,95
20,9	0,81	0,95
21	0,81	0,96
21,1	0,81	0,96
21,2	0,81	0,95
21,3	0,8	0,95
21,4	0,8	0,95
21,5	0,8	0,95
21,6	0,79	0,95
21,7	0,8	0,95
21,8	0,8	0,95
21,9	0,8	0,96
22	0,8	0,96
22,1	0,79	0,95
22,2	0,79	0,95
22,3	0,79	0,95
22,4	0,78	0,95
22,5	0,78	0,95
22,6	0,78	0,95
22,7	0,78	0,95

22,8	0,78	0,95
22,9	0,78	0,95
23	0,78	0,96
23,1	0,78	0,95
23,2	0,77	0,95
23,3	0,77	0,95
23,4	0,76	0,94
23,5	0,76	0,95
23,6	0,76	0,95
23,7	0,77	0,95
23,8	0,77	0,95
23,9	0,76	0,95
24	0,76	0,95
24,1	0,76	0,95
24,2	0,76	0,95
24,3	0,75	0,95
24,4	0,75	0,94
24,5	0,75	0,95
24,6	0,75	0,95
24,7	0,75	0,95
24,8	0,75	0,95
24,9	0,75	0,96
25	0,75	0,95
25,1	0,74	0,94
25,2	0,74	0,94
25,3	0,73	0,94
25,4	0,73	0,94
25,5	0,74	0,95
25,6	0,74	0,96
25,7	0,74	0,96

25,8	0,74	0,96
25,9	0,74	0,96
26	0,73	0,95
26,1	0,73	0,95
26,2	0,72	0,94
26,3	0,72	0,94
26,4	0,72	0,94
26,5	0,73	0,96
26,6	0,73	0,97
26,7	0,73	0,97
26,8	0,73	0,97
26,9	0,73	0,97
27	0,73	0,97
27,1	0,73	0,97
27,2	0,73	0,97
27,3	0,72	0,97
27,4	0,72	0,97
27,5	0,71	0,95
27,6	0,68	0,92
27,7	0,64	0,87
27,8	0,58	0,78
27,9	0,5	0,67
28	0,4	0,54
28,1	0,3	0,4
28,2	0,21	0,28
28,3	0,14	0,19
28,4	0,09	0,12
28,5	0,05	0,07
28,6	0,03	0,04
28,7	0,01	0,02

28,8	0,01	0,01
28,9	0	0
29	0	0
29,1	0	0
29,2	0	0
29,3	0	0
29,4	0	0
29,5	0	0
29,6	0	0
29,7	0	0
29,8	0	0
29,9	0	0
30	0	0

Tabela 4.10: Wskazania komory przelotowej w zależności od grubości absorbenta PMMA oraz wartość uzyskana poprzez dopasowanie prostej do wyników symulacji komory przelotowej.

Grubość [mm]	Wskazanie komory przelotowej [keV ·10 ⁷]	Wartość funkcji liniowej dopasowanej do wyniku symulacji komory [keV ·10 ⁷]
0	1,54	1,82
0,8	2,13	1,92
1,61	2,34	2,01
2,42	1,76	2,11
3,23	2,5	2,2
4,03	1,72	2,29
4,84	2,36	2,39
5,64	3,25	2,48
6,45	2,69	2,58
7,25	2,73	2,67

8,06	2,17	2,77
8,87	2,51	2,86
9,68	2,91	2,96
10,48	3,41	3,05
11,29	3,17	3,14
12,1	3,69	3,24
12,9	2,94	3,33

Spis tabel

1.1	Rozkład dawki na głębokości zmierzony na stanowisku terapii protonowej IFJ PAN w Krakowie.	4
1.2	Profil poprzeczny wiązki zmierzony na stanowisku terapii protonowej IFJ PAN w Krakowie.	19
1.3	Rozkład dawki na głębokości interpolowany na podstawie danych pomiarowych.	23
1.4	Zmierzony poszerzony pik Bragga.	29
2.1	Rozkłady dawki na głębokości dla wiązek monoenergetycznych o energiach 57 MeV, 58 MeV, 59 MeV, 60 MeV i 61 MeV.	34
2.2	Rozkłady dawki na głębokości dla wiązek energii średniej 60 MeV i rozmyciach energetycznych 0,2 MeV, 0,4 MeV, 0,6 MeV, 0,8 MeV i 1,0 MeV. Wiązki te porównane są z wiązką monoenergetyczną o energii 60 MeV (rozmycie 0 MeV)	45
2.3	Rozkłady dawki na głębokości dla wiązek energii średniej 60,2 MeV i rozmyciach energetycznych 0,2 MeV, 0,4 MeV.	56
2.4	Rozkład dawki na głębokości dla wiązki protonów. Pierwotny rozkład energetyczny był rozkładem normalnym o energii średniej 60 MeV i odchyleniu standardowym 0,5 MeV. Został on zmieniony poprzez ustanowienie maksymalnej energii, powyżej której protony nie są symulowane. W tabeli zestawiono rozkłady dawki, dla których energia maksymalna to 60,2 MeV, 60,3 MeV, 60,5 MeV i 65 MeV.	68

2.5	Rozkład dawki na głębokości otrzymany za pomocą symulacji uwzględniającej wszystkie istotne elementy geometrii, oddziaływania. Rozkład energetyczny zadany histogramem. Głębokość uwzględnia przesunięcie o 0,6 mm spowodowane oddziaływaniem z przednią ścianą fantomu wodnego.	79
2.6	Rozkład dawki na głębokości dla wiązki o rozkładzie energetycznym normalnym (energia średnia 60 MeV, odchylenie standardowe 0,2 MeV. Symulacje przeprowadzono dla wiązki równoległej i rozbieżnej. .	89
2.7	Rozkłady dawki na głębokości dla różnych wariantów geometrycznych programu symulacyjnego.	99
2.8	Porównanie głębokościowego rozkładu dawki dla dwóch wariantów oddziaływań fizycznych: z uwzględnieniem oddziaływań jądrowych oraz bez nich dla wiązki protonów o rozkładzie energetycznym opisanym histogramem.	111
3.1	Profile wiązki dla różnych wariantów geometrycznych programu symulacyjnego.	122
3.2	Profil wiązki dla programu uwzględniającego opisane w pracy elementy geometryczne z uwzględnieniem kolimatora końcowego.	126
4.1	Symulacje komputerowe uproszczonego modulatora energii poszerzającego pik Bragga o 4 mm dla wiązki protonów o energii 50 MeV. W tabeli umieszczono energię zdeponowaną przez wiązkę protonów, która nie przeszła przez warstwę absorbenta, a także wiązki, które pokonały warstwę PMMA o grubości 0,5 h i h. W tabeli znajduje się także suma wiązek pomnożonych przez wagi, proporcjonalne do kątów rozwarcia wycinków walca oraz głębokościowy rozkład dawki względnej dla projektowanego modulatora.	129

4.2	Symulacje komputerowe uproszczonego modulatora energii poszerzającego pik Bragga o 4 mm dla wiązki protonów o energii 55 MeV. W tabeli umieszczono energię zdeponowaną przez wiązkę protonów, która nie przeszła przez warstwę absorbenta, a także wiązki, które pokonały warstwę PMMA o grubości 0,5 h i h. W tabeli znajduje się także suma wiązek pomnożonych przez wagi, proporcjonalne do kątów rozwarcia wycinków walca oraz głębokościowy rozkład dawki względnej dla projektowanego modulatora.	139
4.3	Symulacje komputerowe uproszczonego modulatora energii poszerzającego pik Bragga o 4 mm dla wiązki protonów o energii 60 MeV. W tabeli umieszczono energię zdeponowaną przez wiązkę protonów, która nie przeszła przez warstwę absorbenta, a także wiązki, które pokonały warstwę PMMA o grubości 0,5 h i h. W tabeli znajduje się także suma wiązek pomnożonych przez wagi, proporcjonalne do kątów rozwarcia wycinków walca oraz głębokościowy rozkład dawki względnej dla projektowanego modulatora.	148
4.4	Symulacje komputerowe uproszczonego modulatora energii poszerzającego pik Bragga o 4 mm dla wiązki protonów o energii 65 MeV. W tabeli umieszczono energię zdeponowaną przez wiązkę protonów, która nie przeszła przez warstwę absorbenta, a także wiązki, które pokonały warstwę PMMA o grubości 0,5 h i h. W tabeli znajduje się także suma wiązek pomnożonych przez wagi, proporcjonalne do kątów rozwarcia wycinków walca oraz głębokościowy rozkład dawki względnej dla projektowanego modulatora.	160

4.5	Symulacje komputerowe uproszczonego modulatora energii poszerzającego pik Bragga o 4 mm dla wiązki protonów o energii 70 MeV. W tabeli umieszczono energię zdeponowaną przez wiązkę protonów, która nie przeszła przez warstwę absorbenta, a także wiązki, które pokonały warstwę PMMA o grubości 0,5 h i h. W tabeli znajduje się także suma wiązek pomnożonych przez wagi, proporcjonalne do kątów rozwarcia wycinków walca oraz głębokościowy rozkład dawki względnej dla projektowanego modulatora.	175
4.6	Rozkłady dawki na głębokości uzyskane dzięki obrotowi uproszczonego modulatora zasięgu o kąt 360°	191
4.7	Rozkłady dawki na głębokości dla wiązek, które przeszły przez różne grubości absorbenta (wiązki od 1 do 9).	206
4.8	Rozkłady dawki na głębokości dla wiązek, które przeszły przez różne grubości absorbenta (wiązki od 10 do 17).	216
4.9	Symulacje rzeczywistego poszerzonego piku Bragga w dwóch wariantach: z uwzględnieniem wskazania komory przelotowej i bez uwzględnienia komory przelotowej jako czynnego elementu monitorującego wiązkę protonów.	223
4.10	Wskazania komory przelotowej w zależności od grubości absorbenta PMMA oraz wartość uzyskana poprzez dopasowanie prostej do wyników symulacji komory przelotowej.	233